

MÉTHODOLOGIE DE DIAGNOSTIC DES DIGUES

appliquée aux levées de la Loire moyenne

*Michel LINO
Patrice MÉRIAUX
Paul ROYET*



Cemagref
EDITIONS

Méthodologie de diagnostic des digues

**appliquée aux
levées de la Loire moyenne**

MÉTHODOLOGIE DE DIAGNOSTIC DES DIGUES

**appliquée aux
levées de la Loire moyenne**

*Michel Lino
Patrice Mériaux
Paul Royet*

AUTEURS

Michel Lino : ISL
Patrice Mériaux : Cemagref
Paul Royet : Cemagref

CRÉDITS PHOTOS

PHOTOS DES AUTEURS :
pages 28 à 32

PHOTOS CONSTRUCTEURS :
page 128 : GEOMETRICS
pages 132 - 133 - 135 - 136 : GEONICS LIMITED
pages 140 - 145 : ALLIED ASSOCIATES GEOPHYSICAL
pages 148 - 149 : SELVA ÉLECTRONIQUE

Méthodologie de diagnostic des digues appliquée aux levées de la Loire moyenne. *Michel LINO, Patrice MÉRIAUX, Paul ROYET.* ©1999 Cemagref Éditions. ISBN 2-85362-524-9. Dépôt légal 2^e trimestre 2000. Édition, maquette et mise en page *Maurice Merlin.* Infographie et traitement des photos *Françoise Peyriguer.* Impression LOUIS JEAN. Vente par correspondance : PUBLI-TRANS, BP 22, 91167 Longjumeau, Cedex 9 ; tél. : 01 69 10 85 85. Diffusion aux libraires : TEC et DOC, 14 rue de Provigny, 94236 Cachan, Cedex ; tél. : 01 47 40 67 00. Prix : 230 FTTC. 35,06 €TTC.

Avant-propos

L'Équipe pluridisciplinaire du plan Loire grandeur nature a été créée en 1995 de manière partenariale par le ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, l'Agence de l'eau Loire-Bretagne et l'E.P.A.L.A. (Établissement Public pour l'Aménagement de la Loire et de ses Affluents), en particulier pour assurer un appui technique aux maîtres d'ouvrage, sur les opérations spécifiques et nouvelles conduites dans le cadre de ce plan territorial d'aménagement prévu sur 10 ans. Un des thèmes de cet appui a concerné la surveillance, l'entretien et le renforcement des endiguements de protection contre les inondations dont sont responsables les services d'État, gestionnaires des digues domaniales de la Loire moyenne et dont les collectivités territoriales cofinancent les travaux de mise en œuvre.

Cette équipe a confié en 1997-1998 au groupement Cemagref¹ - ISL² une étude dont l'objectif était d'échafauder, à la lumière d'une prise de connaissance experte de la problématique des digues de la Loire (dénommées «levées» dans la terminologie régionale) et de l'analyse critique d'études récentes les ayant concernées, une méthodologie pertinente de diagnostic des ouvrages, déclinée ensuite dans un cahier des charges - type de consultation de bureaux d'études.

A première vue, donc, les résultats de ce travail méthodologique peuvent paraître intimement attachés au contexte du système d'endiguements de la Loire moyenne, dont on récapitule ci-après les principales caractéristiques :

- digues de constitution hétérogène (car plusieurs fois rehaussées et/ou élargies au cours du temps), à dominante sableuse ou sablo-limoneuse ;
- hauteur de la levée (remblai) de l'ordre de 5 à 7 m, crête généralement large et empruntée par une voie de circulation réservée au service ou affectée au réseau routier départemental ou national, existence fréquente d'une murette ou banquette de rehausse en bordure de crête, présence de quelques déversoirs construits à la fin du siècle dernier (jamais entrés en fonction) ;
- gestionnaire identifié (services d'État), assurant un entretien plutôt satisfaisant des talus de digue et des ouvrages hydrauliques ; superposition de gestion des ouvrages en cas de présence d'une route départementale ou nationale ;
- absence, depuis plus d'un siècle, de crue majeure ayant sollicité les levées pour la plus grande partie du linéaire situé en amont de Tours ;
- délai de plusieurs jours pour l'annonce de la crue (conférant a priori la possibilité de pratiquer une défense temporaire) ;
- crue relativement brève (de l'ordre de la semaine), avec des temps de crue et décrue courts, qui induisent une sollicitation particulière dangereuse de la levée lors de la décrue (taux d'abaissement de 5 à 10 cm/h).

Toutefois, la conviction profonde des auteurs est que l'étude méthodologique pour le diagnostic des digues de Loire moyenne possède en elle-même tous les éléments pour être transposable, dans une large

1 Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement

2 Bureau d'ingénierie privé, dont le siège est à Paris 75019, 75 bd Mac Donald (associé, pour l'élaboration des fiches «Méthodes géophysiques», avec la société Géo-Études, 5 rue de Rome, 93561 Rosny-sous-Bois).

mesure, à d'autres contextes d'endiguement de protection contre les inondations. Au moins trois arguments forts militent en ce sens :

- la plupart des choix effectués dans la définition de la méthode sont explicités et justifiés au fil du texte. Aussi, le lecteur a-t-il les moyens de repérer aisément les points de différence entre son cas de figure d'endiguement et celui de la Loire moyenne et d'adapter en conséquence la méthodologie de diagnostic ;
- l'inventaire et la description des techniques et moyens de reconnaissance visuels, géotechniques, géophysiques - qui constituent une part importante du travail accompli (cf. recueil des fiches «méthodes») - ont été réalisés, au moins dans un premier temps, indépendamment de leur perspective d'application sur une levée de type Loire. En fait, l'hypothèse de fond retenue dans l'analyse critique des diverses techniques d'investigation a été le caractère «à sec» de l'endiguement (i.e. : le remblai objet des reconnaissances n'est en charge que lors des crues) - point en général commun à toutes les digues de protection contre les inondations ;
- enfin, depuis 1997, le Cemagref a eu l'occasion de transposer la méthode de diagnostic - moyennant de faciles adaptations - à l'étude d'autres configurations de cours d'eau endigués, en particulier de fleuves côtiers méditerranéens tels que le Vidourle ou le Gardon d'Alès.

Concernant les méthodes de reconnaissance géophysiques et géotechniques des digues, le Projet National CRITERRE (1998 - 2001) devrait apporter des compléments aux recommandations du présent guide.

Ceci justifie pleinement, aux yeux des auteurs, tout l'intérêt de la présente publication, permise grâce à l'aimable autorisation de l'Équipe pluridisciplinaire Plan Loire grandeur nature.

Le public visé par cet ouvrage comprend :

- les gestionnaires ou propriétaires des digues - en principe maîtres d'ouvrages des travaux d'entretien et de confortement ainsi que des études préliminaires nécessaires - et, plus généralement, toutes les entités (notamment celles qui interviennent au titre d'une mission de maîtrise d'œuvre) ayant pour tâche de définir les prescriptions techniques contractuelles d'une étude de diagnostic de digue et d'en suivre l'exécution ultérieure ;
- les bureaux d'études qui sont amenés à mettre en œuvre les méthodes de reconnaissance et de diagnostic des digues et qui contribuent, bien souvent, à la définition - ou, tout au moins, à la précision en cours d'étude - des clauses des cahiers des charges.

Table des matières

CHAPITRE 1 : Description d'ensemble des levées de la Loire moyenne

1.1 Cadre géographique et historique	13
1.1.1 Rappel de la zone d'étude	13
1.1.2 Géologie régionale	13
1.1.3 Aspects historiques	16
1.1.4 Statut des digues et services gestionnaires	21
1.2 Géométrie et morphologie	21
1.2.1 Implantation des digues	21
1.2.2 Profil en long	22
1.2.3 Profil en travers	22
1.2.4 Accessibilité des levées	24
1.3 Le programme de confortement de 1960 à nos jours	24
1.3.1 Les évolutions récentes	24
1.3.2 Les études SIMECSOL-NEDECO	25
1.3.3 Le Programme de 1970	25
1.3.4 Avancement du programme de 1970	25
1.3.5 Les méthodes de renforcement	26
1.4 Les actions en cours dans le cadre du Plan Loire grandeur nature	28

Chapitre 2 : Analyse des études diagnostic récentes

2.1 Rappel des conclusions des études SIMECSOL - NEDECO	35
2.1.1 Méthodes d'investigation	35
2.1.2 Méthodes de confortement	35
2.2 Études diagnostic récentes	36
2.2.1 Méthodologies mises en œuvre et résultats	36
2.2.2 Quels enseignements tirer de ces exemples ?	38
2.2.3 Tableau comparatif des études récentes réalisées pour le diagnostic des levées de la Loire	39

CHAPITRE 3 : Les mécanismes de dégradation et de rupture

3.1 Analyse historique des ruptures	51
3.2 Mécanismes potentiels de dégradation et de rupture	53
3.2.1 Surverse	53
3.2.2 Ruptures en retour	53
3.2.3 Rupture des «banquettes»	53
3.2.4 Érosion de talus et affouillements	54

3.2.5 Renard hydraulique	55
3.2.6 Instabilité d'ensemble de la levée	55
3.3 Conclusions opérationnelles pour un diagnostic adapté	56
CHAPITRE 4 : Proposition de méthode de diagnostic	
4.1 Approche historique	61
4.2 Approche morphodynamique	61
4.3 Topographie	63
4.3.1 Objectif	63
4.3.2 Profil en long des levées par rapport aux plus hautes eaux en crues	63
4.3.3 Profils en travers	64
4.3.4 Plan topographique	64
4.4 Étude hydraulique	64
4.4.1 Cas de la Loire proprement dite	64
4.4.2 Cas des affluents	65
4.5 Inspection visuelle	65
4.5.1 Justification et principe de la méthode	65
4.5.2 Conditions et moyens de mise en œuvre	66
4.5.3 Les points à observer et informations à répertorier	66
4.5.4 Modalités de report et de restitution des informations	68
4.5.5 Coût et limites de l'inspection visuelle	68
4.6 Reconnaissances géotechniques	69
4.6.1 Les conditions pour la définition d'un programme de reconnaissances	69
4.6.2 Programme minimum de reconnaissances	69
4.6.3 Reconnaissances en continu à caractère optionnel	72
4.6.4 Coût récapitulatif	72
4.7 Modélisation	72
4.7.1 Considérations générales	72
4.7.2 Modélisation hydraulique	73
4.7.3 Modélisation géomécanique	74
4.8 Hiérarchisation cartographique des risques liés à la rupture	74
4.9 Solutions de confortement	75
4.9.1 Principales options de confortement selon les situations	75
4.9.2 Objectif à assigner au titre de la phase de conception des confortements	77
4.9.3 Éléments de justification et contraintes techniques à faire prendre en compte	77

CHAPITRE 5 : Méthodes de diagnostic lors des crues

5.1 Inspection visuelle en crue	83
5.1.1 Justification et principe de la méthode	83
5.1.2 Conditions et moyens de mise en œuvre	84
5.1.3 Les points à observer et informations à répertorier	85
5.1.4 Modalités de report et de restitution des informations	86
5.1.5 En résumé	86
5.2 Thermographie héliportée	87
5.2.1 Description et principe de la méthode	87
5.2.2 Conditions d'application	88
Conditions météorologiques	88
État de surface	88
5.2.3 Moyens mis en œuvre et coûts	88
5.2.4 Application aux levées de la Loire	89
5.3 Inspection visuelle post-crue	90
5.3.1 Justification et principe de la méthode	90
5.3.2 Conditions et moyens de mise en œuvre	90
5.3.3 Les points à observer et informations à répertorier	91
5.3.4 Modalités de report et de restitution des informations	92
5.3.5 Rendement prévisible	92
5.3.6 En résumé	92
5.4 Méthodes géophysiques appliquées en conditions post-crue	93

CHAPITRE 6 : Recueil de fiches relatives aux différentes méthodes de reconnaissance des levées

Inspection visuelle et topographie

Topographie	98
Reconnaissance visuelle initiale	101
Inspection visuelle de routine	107
Inspection visuelle en crue	113
Inspection visuelle post-crue	119

Méthodes géophysiques

Tableau de synthèse des méthodes géophysiques	125
Sismique réfraction	127
Électromagnétisme à émetteur / récepteur portatif mobile EM 31	131
Électromagnétisme à émetteur / récepteur portatif mobile EM 34	135
Électromagnétisme à émetteur / récepteur portatif mobile (le RADAR)	139
Résistivité électrique (sondage électrique)	143
Radio magnétotellurique (RMT)	147
Résistivités électriques (l'imagerie électrique)	151

Reconnaitssances géotechniques et Essais de laboratoire	155
Pénétrromètre dynamique léger à enregistrement numérique (PANDA)	155
Essai in situ - Essai de perméabilité Lefranc	157
Perméafor	159
Phicomètre	161
Forages mécaniques	163
Essais de laboratoire	167
CHAPITRE 7 : Cahier des clauses techniques particulières (C.C.T.P.)	
Cahier des clauses techniques particulières (C.C.T.P.)	177
Annexe au CCTP-type d'étude de diagnostic des levées de la Loire	209
Chapitre 8 : Dossier-type de description des levées	
Reconnaissance visuelle initiale : fiche de relevé des désordres - Notice d'utilisation	215
Fiches de relevé des désordres :	
- 1 fiche vierge	222
- 2 exemples de fiche remplie	223

Chapitre 1

Description d'ensemble des levées de la Loire moyenne

1.1 CADRE GÉOGRAPHIQUE ET HISTORIQUE

1.1.1 RAPPEL DE LA ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude concerne les 450 km de la Loire moyenne entre le Bec d'Allier et le Bec de Maine. 700 km de levées encadrent le fleuve, délimitant 100 000 ha de vals inondables.

Le système des levées de la Loire moyenne concerne la Loire proprement dite mais également ses principaux affluents (le Cher, l'Indre et la Vienne).

Six départements appartenant à trois régions sont concernés, soit de l'amont vers l'aval : pour la région Bourgogne, la Nièvre, pour la région Centre, le Cher, le Loiret, le Loir-et-Cher et l'Indre-et-Loire et pour la région des Pays de Loire, le Maine-et-Loire.

Plusieurs villes importantes sont protégées par les levées, Tours à la confluence de la Loire et du Cher avec 90 000 habitants concernés, Orléans avec 56 000 habitants et Blois avec 10 000 habitants.

Le val d'Authion présente également un fort enjeu avec 45 000 habitants protégés par une levée de 80 km et soumise, du fait de sa longueur, à un risque de brèche particulièrement élevé.

La figure n°1 donne la localisation schématique des principaux vals entre Nevers et Angers. Elle fait apparaître les vals inondés lors de la crue de 1856.

1.1.2 GÉOLOGIE RÉGIONALE

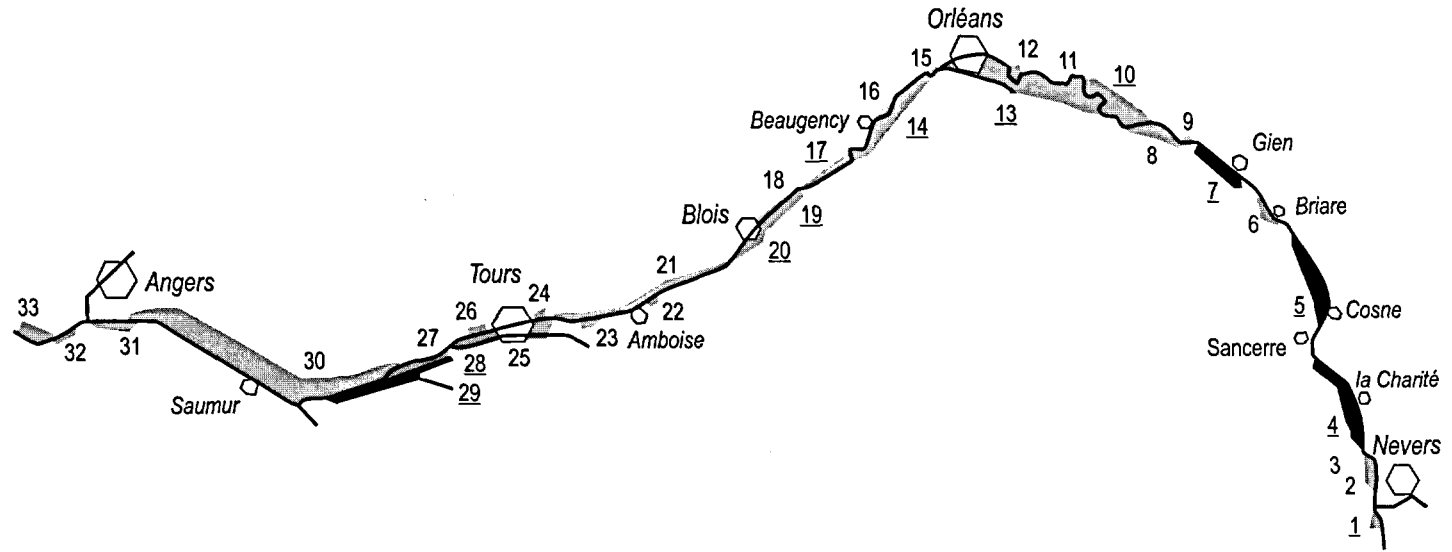
La Loire moyenne se rattache géologiquement à la couverture calcaire du bassin parisien.


Du Bec d'Allier au Bec de Maine, la vallée de la Loire et ses trois grands affluents rive gauche traversent successivement les différentes auréoles sédimentaires, secondaires et tertiaires, du Bassin parisien. La figure n°2¹ montre le profil en long schématique et les roches sous-jacentes :


- les calcaires jurassiques affleurant à l'amont de Nevers à Cosne-sur-Loire ;
- la frange crétacée entre Cosne-sur-Loire et Gien ;
- les formations tertiaires principalement représentées par la table des calcaires de Beauce (miocène) entre Gien et Blois. Ces formations affleurent en rive droite de la Loire et sont recouvertes par les formations éluviales provenant de l'altération des granites du Massif central (Brenne et Sologne) en rive gauche ;
- les formations crétacées réapparaissant de façon dominante à l'aval de Tours et jusqu'à Angers.

Les tables calcaires au nord de la Loire sont généralement plus perméables que celles situées au sud de la Loire. En particulier, la table de Beauce s'individualise par sa remarquable perméabilité. Au sud de la Loire, les formations éluviales de la Sologne et de la Brenne recouvrant les calcaires sous-jacents assurent leur imperméabilisation.

¹ d'après Y. Baboneau « Le lit de la Loire », 1971



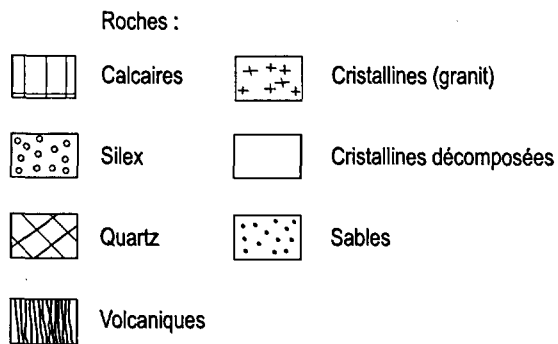
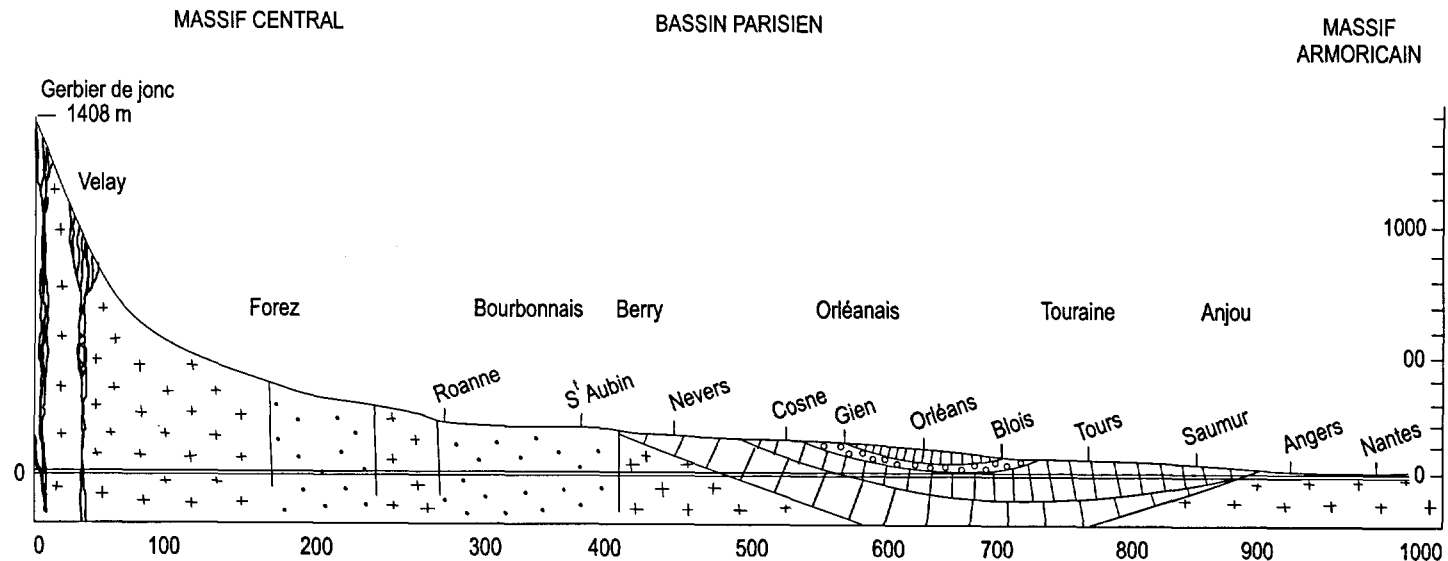
 Val inondé en 1856 mais préservé de l'inondation par une crue de même type avec Villerest et le Veudre (Sogreah 1982)

 Val inondé en 1856 et inondé par une crue de type 1856 même en présence de Villerest et du Veudre (Sogreah 1982)

- | | | | | | |
|------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------|-------------------------|
| 31 GOHIER | 25 TOURS | 19 BLOIS amont (Montivault) | 13 ORLEANS - JARGEAU | 7 GIEN | 1 GUETIN |
| 32 LOUET | 26 LUYNES | 20 BLOIS aval (La Bouillie) | 14 ARDOUX | 8 SULLY | 2 GIVRY AMONT |
| 33 SAVENNIERES | 27 LANGEAIS | 21 CISSE | 15 BOUVIERE | 9 DAMPIERRE | 3 GIVRY AVAL |
| - Val muni | 28 LA CHAPELLE AUX NAUX | 22 CHARGE | 16 BAULE | 10 OUZOUER | 4 LA CHARITE LES RAPINS |
| - d'un déversoir | 29 VIEUX CHER | 23 HUSSEAU | 17 AVARAY | 11 CHATEAUNEUF | 5 LERE |
| | 30 AUTHION | 24 TOURS RIVE DROITE | 18 MENARS | 12 BOU | 6 SAINT FIRMIN |

Figure 1 : Disposition et dénomination des tois le long de la Loire moyenne (source : Equipe pluridisciplinaire Plan Loire grandeur nature).

Figure 2 : Profil en long de la Loire et roches sous-jacentes.



Les calcaires de Beauce présentent une morphologie karstique avec dolines, gouffres et vallées sèches.

Dans le lit majeur de la Loire, la karstification se traduit par la présence de fontis et constitue un facteur de risque spécifique pour les levées (effondrements, renard...). La source du Loiret est un exemple remarquable de résurgence après un parcours souterrain d'environ 40 km.

Les phénomènes de karstification peuvent se rencontrer à des degrés divers sur tout le cours de la Loire moyenne.

Du point de vue des conditions géotechniques de fondation, les digues sont généralement fondées sur les alluvions du lit majeur de la Loire, elles-mêmes reposant sur un substratum calcaire, généralement peu profond.

La figure n°3² donne une coupe schématique du Val de Loire à Blois.

La figure n°4³ donne une coupe schématique à travers la vallée de la Loire à hauteur de Saumur.

1.1.3 ASPECTS HISTORIQUES

Le livre de Roger Dion « *Histoire des levées de la Loire* » est la référence incontestée en la matière. Par ailleurs, l'histoire des protections contre les crues de la Loire a fait l'objet d'une synthèse récente ⁴ sous l'égide du Préfet coordonnateur du Plan Loire grandeur nature.

Il ne fait pas partie de notre propos de reprendre ces travaux auxquels on se reportera utilement.

On s'intéresse ici aux aspects historiques dans la mesure où ils expliquent ou renseignent sur la conception des endiguements et la constitution des levées.

DE CHARLEMAGNE À HENRI II PLANTAGENËT

Les premières « turcies » remontent à Charlemagne : elles étaient constituées d'un mélange de fascines en bois et de terre renforçant localement le cordon alluvial et reliant entre elles les buttes insubmersibles.

Leur vocation était de permettre l'inondation sans courant des terres cultivées assurant la fertilisation des terres par les limons et empêchant l'ensablement. Il est probable que des vestiges de ces anciennes défenses se rencontrent au sein des digues actuelles.

Une étape importante dans la constitution du système des levées est le peuplement des turcies sous Henri II Plantagenêt, afin d'assurer leur entretien et leur développement. Cette lointaine histoire explique qu'en particulier en Anjou de nombreuses maisons soient construites sur ou à proximité immédiate des levées, créant autant de points singuliers pour le programme actuel de renforcement.

² d'après Y. Baboneau « *Le lit de la Loire* », 1971

³ (d'après H. Talbo).

⁴ *La Loire, Histoire des protections contre les crues - Direction régionale de l'Équipement du Centre et la Direction régionale de l'Environnement du Centre - septembre 1996*

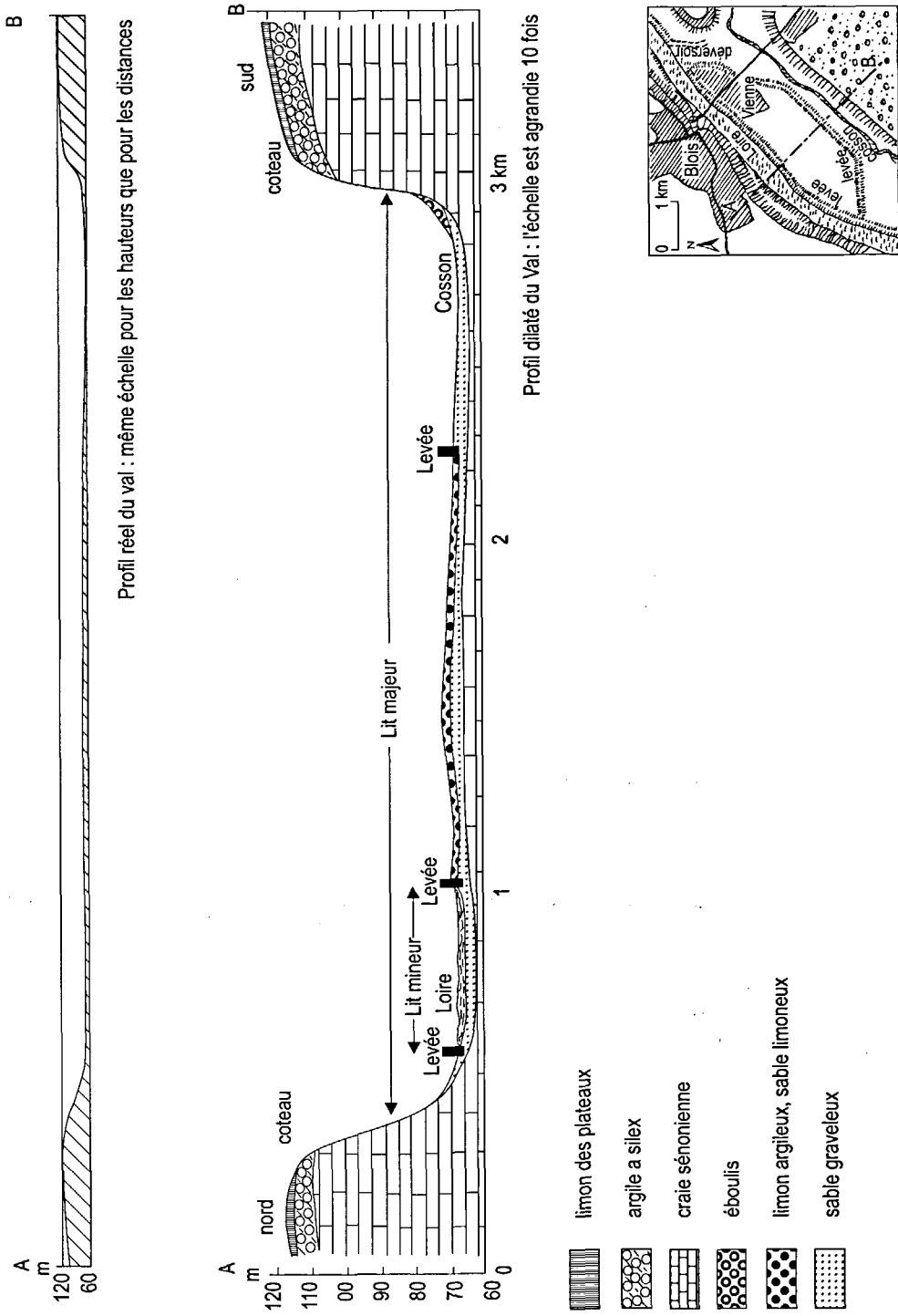


Figure 3: Profil en travers du Val de Loire à Blois (Source : «Histoire de la Loire»).

L'ANCIEN RÉGIME

A partir du XV^e siècle, le *processus d'endiguement* se met en place : plus le val est cultivé et construit, plus les enjeux de protection deviennent importants. Les anciennes levées se transforment en endiguements destinés à limiter les divagations du fleuve. Elles sont considérées par les règlements royaux comme un système cohérent et homogène. La protection des lieux habités et l'aménagement du lit mineur pour la navigation deviennent progressivement les fonctions dominantes assignées aux levées.

Il en résulte un changement majeur dans la conception des ouvrages : les levées ont désormais pour objectif d'encadrer au plus près le lit du fleuve. Ainsi, *les levées plus récentes qui font suite à celles du Val d'Orléans jusqu'à Blois vers l'aval et jusqu'à Gien vers l'amont ont pu être construites du premier coup suivant les principes du XVI^e siècle, et sur un plan qui trahit l'intention bien arrêtée d'assigner au lit mineur une largeur inférieure à 400 m. Ces dimensions paraissent dangereusement restreintes lorsqu'on les compare à celles du grand fleuve sauvage, large de 800 à 1000 m que l'on découvre des hauteurs de Sancerre* (Dion p.150). Les digues sont désormais des ouvrages d'ingénieurs, édifiés et gérés sous le contrôle de l'Administration royale.

Concernant les risques de brèches dans les levées, on peut retenir que les zones de plus forte contraction du lit mineur du fleuve, en particulier au passage de villes et des ponts sont celles où les sollicitations du fleuve sur les digues sont les plus puissantes.

L'histoire des endiguements s'est développée suivant deux axes : historiquement ce sont les régions les plus aval de l'Anjou et du Maine qui ont été les premières endiguées et l'endiguement a progressé vers l'amont. L'endiguement progressif de la rivière a eu comme inéluctable conséquence l'exhaussement de la ligne d'eau en crue avec une course (perdue d'avance?) au relèvement et au renforcement des levées.

La création des premiers déversoirs remonte au début du XVII^e siècle : « ..., dans le Conseil de Louis XIII prévaut, en 1629, l'opinion que le réseau des levées présente, en certains de ses étranglements ou certaines de ses concavités, plusieurs points faibles où les travaux les plus diligents ne sauraient empêcher la formation des brèches, et que le moyen le plus efficace d'éviter celles-ci est d'ouvrir par avance au fleuve les issues qu'il crée lui-même de vive force lorsque la puissance de son débit dépasse une certaine limite. » (Dion p.164). Profitant de l'expérience réussie du déchargeoir de Blois, l'arrêt de ce Conseil prescrit d'ouvrir six déchargeoirs, répartis sur toute l'étendue des vals alors endigués, depuis Ouzouer en Orléanais jusqu'à Saumur. Devant l'opposition résolue des populations des vals concernés, ce sage programme resta lettre morte.

A la fin du XVII^e siècle, Colbert, surintendant des bâtiments de France à partir de 1664, ne poursuivra pas cette idée des déchargeoirs. Confiant dans le concept des digues insubmersibles, pourvu qu'elles soient suffisamment hautes et solides, il se donne pour objectif principal la consolidation de l'existant (règlement de 1668 définissant les mesures visant à la conservation des levées, projets de création de déversoirs qui n'aboutirent pas à des réalisations, hauteur au dessus de l'étiage de 3 toises (3 x 1,949 = 5,85 m), travaux de consolidation portant la largeur en crête à 4 toises (7,80 m) et largeur à la base égale à 6 fois la hauteur). C'est également sous l'administration de Colbert que la pierre se substitue définitivement au bois dans les revêtements destinés à protéger les talus des levées contre les « corrosions fluviales ».

Mais, le résultat le plus durable de l'œuvre de Colbert est sans doute l'établissement de la mainmise définitive de l'État sur l'ensemble des travaux publics exécutés au bord du fleuve ou dans son lit même.

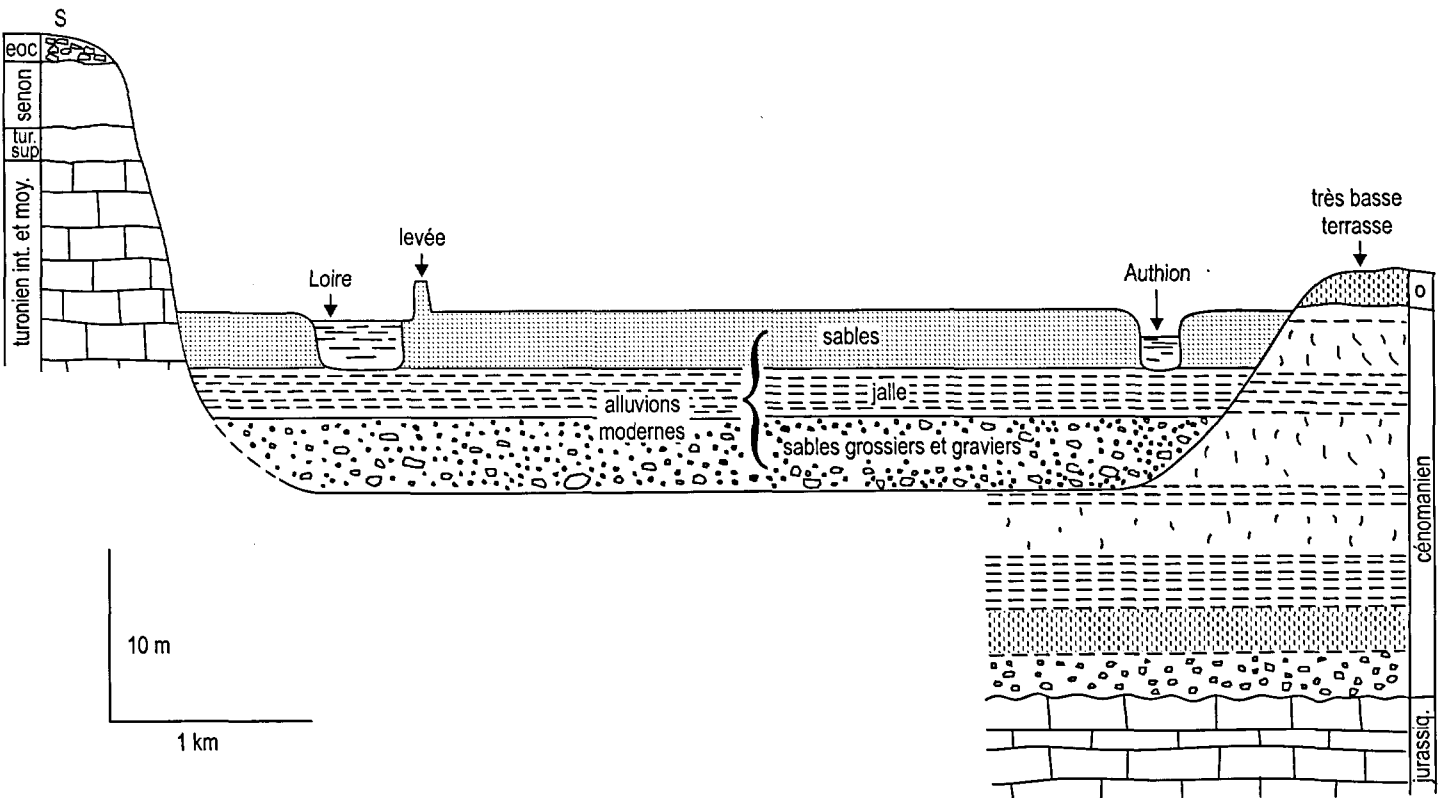


Figure 4 : Coupe schématique à travers la vallée de la Loire à hauteur de Saumur (d'après H. Tabo).

La destruction des levées lors des crues de 1707, 1709, 1710, 1711, 1712, et 1715 ruine l'œuvre de Colbert et entraîne l'exhaussement des levées au XVIII^e siècle, réalisé dans la hâte et avec des profils raides 3 ou 4 H/1V par dessus les levées anciennes. Il est intéressant de noter que les ingénieurs des Turcies et Levées de l'époque attribuèrent les inondations catastrophiques du début du XVIII^e siècle aux travaux d'agrandissement du lit de la Loire (destruction de verrou rocheux et de digues de moulins à l'amont de Roanne). Trois digues en pierre furent construites à l'amont de Roanne de façon à lamener les crues à l'amont des verrous ainsi créés. Ces trois ouvrages sont les lointains ancêtres des modernes barrages écrêteurs de crues de Villerest sur la Loire et du Veurdre en projet sur l'Allier.

La « crue de Pentecôte » 1733 dépasse 6 m à Orléans et vint soumettre à rude épreuve le système de défense. Les levées de 21 ou 22 pieds furent rompues dans le Val d'Orléans, à Varennes de Tours et ailleurs, aussi facilement que l'avaient été les levées de 15 pieds et les dévastations furent considérables.

DU XIX^e SIÈCLE À NOS JOURS

La violente crue du 22 octobre 1846 vient reposer de façon dramatique la sécurité des vals inondables. « *Le problème de la sécurité du val, délaissé depuis un demi-siècle, revenait tout à coup au premier plan des préoccupations relatives à la Loire ; et il apparaissait, après l'illusion qu'on avait eu de l'avoir résolu, plus inquiétant et plus obscur que jamais* » (Dion, p.223). Le Conseil Général des Ponts et Chaussées se déclare, faute d'information suffisante, incapable de prendre un parti lorsqu'il fut appelé à se prononcer sur un système de défense à adopter pour prévenir le retour d'une catastrophe pareille à celle de 1846. Le Conseil fixa le programme des études à entreprendre et c'est l'origine de la belle carte au 1/20 000 de la Loire depuis l'extrémité supérieure du département de la Loire jusqu'à Saint-Nazaire en hachure, qui fut publiée de 1848 à 1855. C'est également suite à cette crue que le Conseil Général des Ponts et Chaussées décide d'édifier sur la plate-forme des digues insubmersibles une « banquette » de protection arasée à 0,50 m au-dessus du plus haut niveau atteint par la crue de 1846.

La crue de 1856 reste la crue de référence de ce que peut être une grande inondation dans la vallée de la Loire. Du Bec d'Allier à Nantes, la Loire fait, dans les levées, 160 brèches d'une longueur totale de 23 km, inonde 100 000 ha, détruit 2 750 ha de terres de culture par ensablement et érosion.

L'ingénieur Comoy est chargé de diriger les études entreprises en vue d'arrêter un plan de défense contre les inondations. Son travail fut en tout point remarquable. Il établit pour la première fois la clé de l'énigme du fléau « toujours supérieur à lui-même » : « *L'augmentation de hauteur des crues produite par un endiguement, écrit-il, provient de deux causes, on ne saurait trop le redire : d'abord du resserrement produit par l'endiguement ; ensuite de l'augmentation du débit maximum ; augmentation qui est la conséquence de l'endiguement lui-même, de la diminution que l'endiguement apporte dans la superficie des plaines submergées* ».

« *C'est sa pensée qui, de nos jours encore, régit les levées de la Loire* », écrivait R. Dion en 1934. Ce jugement reste aujourd'hui d'actualité. Un nouveau plan de défense fut élaboré, visant à prévenir la formation de brèches en ménageant un trop plein pour les grandes crues par des issues vers les vals.

La crue de 1866, à peine moins dangereuse que celle de 1856, conduit, l'année suivante, à un projet de créations de déversoirs, version moderne des déchargeoirs de l'ancien régime. Le programme prévoyait la réalisation de 19 déversoirs, dont 7 seulement ont finalement été exécutés dans les vingt années qui suivirent (cf. photo 1 en fin de ce chapitre).

Le dernier élément à retenir est l'absence de grandes crues depuis les 3 événements exceptionnels du milieu du XIX^e siècle. Le dispositif actuel, pour l'essentiel inchangé dans sa géométrie depuis la fin du siècle dernier, n'a pas eu à subir l'épreuve d'une très grande crue : la seule épreuve véritable fut la crue d'octobre 1907, laquelle atteignit son maximum au moment où allaient céder les banquettes de terre qui surmontent la plate-forme des déversoirs.

La Loire rentre alors dans l'oubli. La maintenance minimale n'est plus assurée et en 1925, l'administration des Ponts et Chaussées décide l'abandon de tous travaux d'amélioration.

La création de l'Agence Financière de Bassin en 1964 ouvre la période moderne et actuelle, marquée par le programme de renforcement des levées de 1970, revu en 1983 et réalisé au trois quart au début de l'année 1995 (voir § 1.3).

Les actions du Plan Loire grandeur nature, dans le cadre desquelles s'inscrivent les présentes réflexions, constituent la plus récente contribution apportée à l'œuvre millénaire d'aménagement de la Loire moyenne.

1.1.4 STATUT DES DIGUES ET SERVICES GESTIONNAIRES

Résultat de leur histoire millénaire et de la mainmise du pouvoir royal sur la maintenance et le développement des Turcies et Levées, le statut des levées est généralement domanial.

Dans le département du Maine-et-Loire, 69 km de levées privées sont gérées par des associations syndicales.

Les digues sont gérées par des services dépendant des directions départementales de l'Équipement :

- DDE de la Nièvre, Service hydrologie et voies navigables : subdivision navigation de Briare, de Nevers à Briare ;
- DDE du Loiret : subdivision de la Loire, de Briare à Beaugency ;
- DDE du Loir-et-Cher : bureau hydraulique, de Beaugency à Amboise ;
- DDE de l'Indre-et-Loire : subdivision navigation de Tours, d'Amboise à Saumur ;
- Service maritime et de navigation de Nantes : subdivision navigation d'Angers, de Saumur à Ancenis.

Un club des gestionnaires de la Loire a été créé récemment à l'initiative de l'Équipe pluridisciplinaire Plan Loire grandeur nature et se réunit régulièrement.

1.2 GÉOMÉTRIE ET MORPHOLOGIE

1.2.1 IMPLANTATION DES DIGUES

L'implantation des digues dans le lit majeur de la rivière n'est pas uniforme d'amont en aval. Elle constitue un paramètre significatif de la vulnérabilité des digues. Les parties les plus exposées correspondent :

- aux tronçons où le lit mineur est le plus étroit dans lesquelles les hauteurs d'eau et les vitesses sont augmentées. Cette situation se rencontre fréquemment à l'amont de Tours et prévaut généralement à la traversée des villes riveraines. La largeur du lit entre les levées ou entre la levée et le coteau opposé est typiquement de 800 à 1000 m en aval de Tours, alors qu'elle est souvent réduite à 400 m entre Orléans et Tours ;

- aux zones de concavité en particulier lorsque la digue est implantée à proximité du lit mineur : les actions érosives du fleuve sont alors maximales.

1.2.2 PROFIL EN LONG

Le profil en long des digues, pendant leur longue histoire, a été défini par leur hauteur au dessus du niveau de l'étiage. Depuis les turcies primitives jusqu'aux levées actuelles, on assiste à une surélévation progressive suite aux crues elles-mêmes sans cesse renforcées par le développement de l'endiguement.

On retiendra les étapes suivantes :

- XV^e siècle : la conception de digues insubmersibles s'impose avec Louis XI et la hauteur des digues est fixée à 15 pieds (environ 5m) au dessus de l'étiage ;
- Colbert, en 1680, édicte un règlement portant les digues à une hauteur de 3 toises, soit 5,85 m, et une largeur de 4 toises en couronne. Il préconise que la largeur en pied doit être égale à 6 fois la hauteur ;
- suite aux crues catastrophiques de la première moitié du XVIII^e siècle (1707, 1709, 1710, 1711, 1733), les digues sont hâtivement rehaussées pour atteindre jusqu'à une hauteur de 7 m au dessus de l'étiage ;
- suite à la crue de 1846, on décide d'édifier sur la plate-forme des digues insubmersibles une « banquette » de protection arasée à 0,50 m au-dessus du plus haut niveau atteint par la crue de 1846 ;
- le plan Comoy suite à la crue de 1856 demande à ce que la plate-forme soit portée à 0,30 m au dessus du niveau atteint par les crues de 1856-1866 et surmontée d'une banquette de protection dominant ce même niveau de 1,10 m. Cette prescription fut effective dans le département d'Indre-et-Loire à partir de 1922.

1.2.3 PROFIL EN TRAVERS

Les turcies primitives étaient constituées d'un mélange de fascines en bois et de terre. Ces structures se retrouvent probablement au cœur de maintes levées actuelles.

Dion distingue clairement les notions de turcies et levées. Les turcies sont des ouvrages submersibles de défense du val contre l'ensablement et les érosions. Les levées furent, au contraire, conçues comme des ouvrages insubmersibles. Elles sont construites avec les alluvions sableuses de la Loire.

La plupart des levées accueille une route sur leur couronnement. Dans l'état actuel, ces routes sont généralement constituées par une chaussée bitumée.

Le talus coté Loire est parfois revêtu d'un perré maçonné lorsque la levée est construite à proximité du lit mineur et soumise à l'action du courant (cf. photos 7 et 8). Ces perrés sont généralement fondés sur pieux (c'est le cas sur la digue du Val de Bou).

Les levées sont le plus souvent hors d'eau en dehors des périodes de crues sauf dans la partie aval du cours de la Loire où l'on rencontre des levées dont le pied coté Loire est noyé même en période d'étiage. C'est par exemple le cas de la levée de Fondette à l'aval de Tours et des levées protégeant le Val d'Authion.

Les pentes des levées anciennes étaient très douces. Le règlement de Colbert de 1680 fixe la règle d'une largeur à la base égale à 6 fois la hauteur, propre à assurer une bonne stabilité des digues.

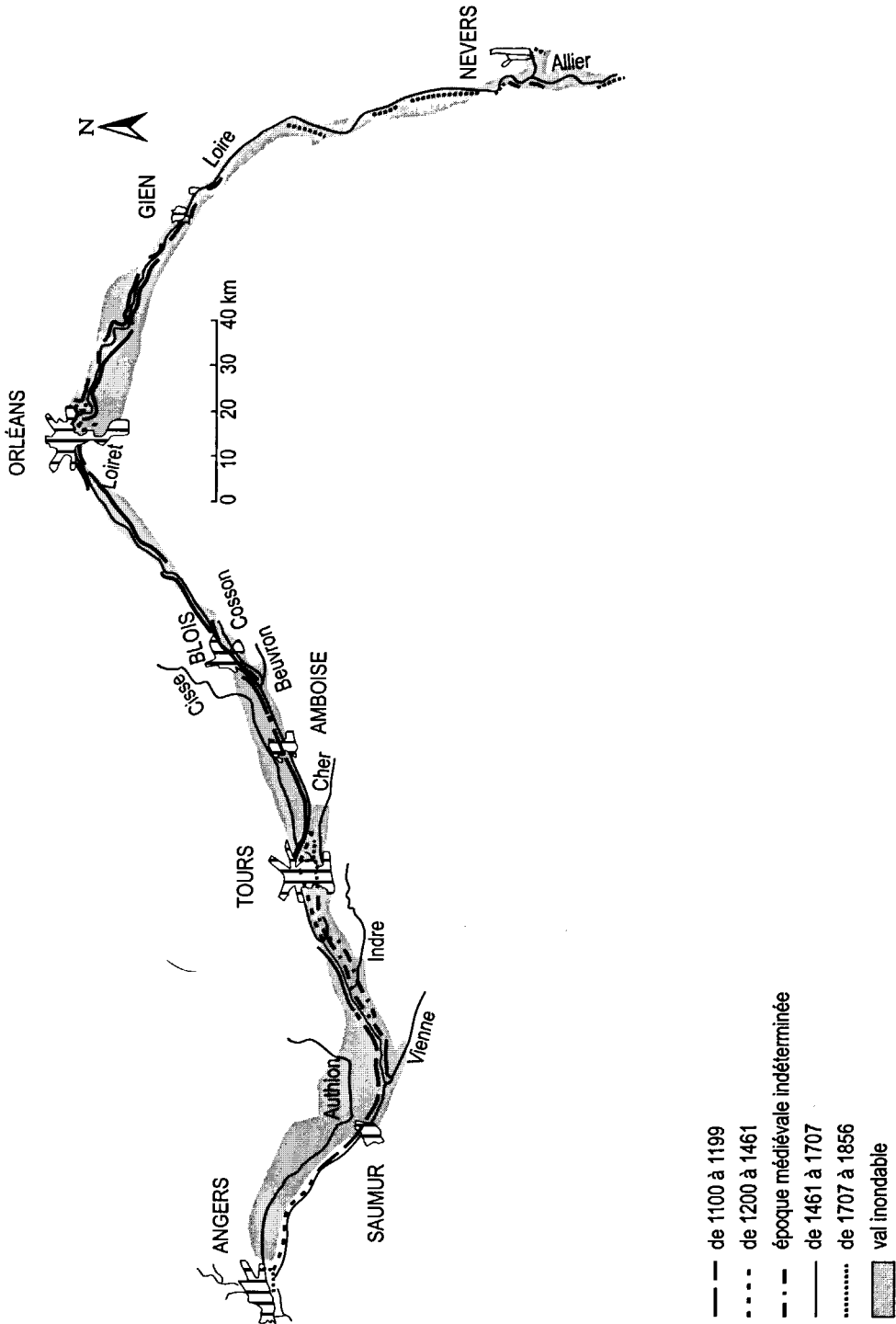


Figure 5 -1 : Extensions successives des levées (Source : «Histoire des levées de la Loire»).

Cette règle est abandonnée lors des surélévations du XVIII^e siècle : les levées anciennes sont simplement recouvertes de remblais de sables. Les pentes des talus dépassaient le maximum de 30° (≈1,7H/1V) imposé par les règlements royaux aux ouvrages anciens.

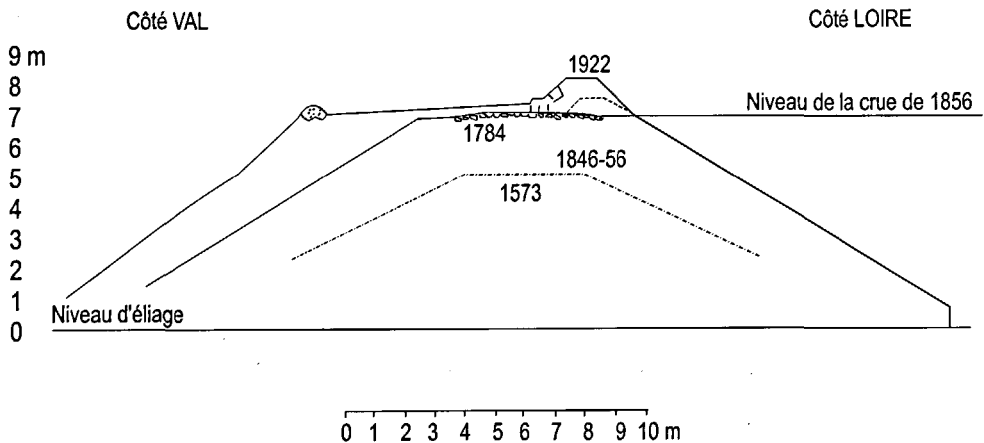
Les figures n°5-1 et 5-2 montrent respectivement l'extension géographique des levées du XII^e au XIX^e siècle et l'évolution du profil de la levée du Val d'Authion du XVI^e siècle jusqu'au début du XX^e.

1.2.4 ACCESSIBILITÉ DES LEVÉES

De tous temps, les levées ont été utilisées comme voies de communication et sont, en conséquence, facilement accessibles (cf. photos 2 et 9).

On peut considérer que sur 700 km de levées en Loire moyenne, une vingtaine de kilomètres seulement n'est pas facilement accessible, parmi laquelle on citera la digue du Vieux Cher et la levée de La Charité (cf. photo 3).

La contrepartie de cet avantage est que les travaux à entreprendre pour le diagnostic ou pour le renforcement des digues sont effectués sous les contraintes de la circulation. A titre d'exemple, la levée du Val d'Authion est occupée par les routes nationale 152 à l'amont de Saumur et départementale 952 entre Saumur et Angers qui constituent un axe très fréquenté.



1.3 LE PROGRAMME DE CONFORTEMENT DE 1960 À NOS JOURS

1.3.1 LES ÉVOLUTIONS RÉCENTES

A partir de la fin des années 1950, à la problématique des crues vient s'ajouter celle des étiages. De 1963 à 1988, 18 réacteurs nucléaires sont installés sur les rives du fleuve.

Les extractions massives de granulats à partir des années 1950 sont également un élément majeur. Il en a résulté une évolution accélérée du lit de la Loire : son enfoncement pose aujourd'hui en des termes nouveaux le problème du calage des levées et des déversoirs.

1.3.2 LES ÉTUDES SIMECSOL-NEDECO

La nécessité d'un renforcement cohérent du système des levées de la Loire est clairement perçue par les gestionnaires et un programme d'étude est réalisé en 1964 par SIMECSOL et NEDECO.

L'étude a permis de définir les facteurs essentiels de la tenue des digues :

- perméabilité : les sections les plus perméables des digues sont les plus sensibles ;
- degré de compacité ;
- granulométrie du remblai.

Divers moyens de confortement ont été préconisés :

- compactage par vibration (système Johann Keller) pour les sections en sable et gravier ;
- mise en place d'un rideau de palplanches ;
- paroi moulée bentonite-ciment ;
- renforcement par apport aval (côté val) et drainage de pied.

Une des conclusions de l'étude est que l'on sait renforcer les levées de façon sûre mais qu'il n'existe pas de moyens d'investigation permettant d'identifier de façon fiable les faiblesses relatives des levées.

Il n'a pas été trouvé dans les documents mis à notre disposition par l'Agence de l'Eau la (ou les) coupe(s) type proposée(s) au terme de ces études.

On retient toutefois qu'une règle générale a été appliquée portant la largeur à la base à 8 fois la hauteur, ce qui, compte tenu de la largeur moyenne en crête, correspond à des fruits de l'ordre de 3H/1V (cf. chapitre 2, §2.1).

1.3.3 LE PROGRAMME DE 1970

En 1970, le rapport Chapon propose un programme ambitieux de protection des vals de Loire moyenne

Ce programme prévoit le renforcement de 288 km de levées « insubmersibles » dans les quatre départements riverains de la région Centre. Le programme de renforcement a été porté à 317,5 km en 1983. Le programme de 1970 prévoyait également la construction de 2 barrages écrêteurs de crues, Villerest sur la Loire à l'amont de Roanne, qui a effectivement été mis en service en 1984 et LeVeurdre sur l'Allier dont la décision finale reste à prendre.

1.3.4 AVANCEMENT DU PROGRAMME DE 1970

Le tableau ci-après donne l'état d'avancement en 1995 du programme dans la région Centre :

Départements	Programme de 1970 (km)	Programme de 1983 (km)	Réalisé au 1/01/95 (km)	Taux de réalisation / 1983
CHER	40	59,5	48,3	80%
LOIRET	110	108,5	80 à 100	80% à 90%
LOIR-et-CHER	24	50,5	34	70%
INDRE-et-LOIRE	114	99	66	66%
TOTAL	288	317,5	228 à 248	75%

CHER

Le programme est réalisé à 80%.

LOIRET

Le programme de 1970 est considéré comme réalisé à 90%.

Le Val de Bou est en cours de renforcement.

Il est envisagé la construction d'une levée nouvelle ainsi que quelques travaux ponctuels de renforcement.

LOIR-ET-CHER

Le programme de 1970 (24 km à renforcer) doublé en 1983 (50,4 km) a été réalisé sur 34 km et il est considéré comme achevé par le Département. Celui-ci juge en effet inutile de renforcer 13 km de levées efficacement protégées par le déversoir de Blois. Ce point devrait être vérifié par les études hydrauliques en cours.

Le renforcement de 12 km de levées du Val d'Avaray, qui n'avait pas été retenu dans le cadre du programme de 1970, est en cours de réalisation.

INDRE-ET-LOIRE

Le programme est réalisé aux deux-tiers. Un programme de 50 km de renforcement est proposé par le Département :

- 7 km au Val de Cisse ;
- 4 km sur le Val d'Authion ;
- 10 km sur le Val de Luynes ;
- 13 km à la Chapelle-aux-Naux - Bréhémont ;
- 15 km sur les digues du Cher.

A l'amont et à l'aval de Tours, des diagnostics sont à réaliser sur les digues renforcées dans le cadre du programme de 1970.

MAINE-ET-LOIRE

Le département du Maine-et-Loire n'était pas concerné par le programme de 1970.

En conclusion, le programme de renforcement peut être considéré réalisé à 75%. Les 25% du programme non réalisés correspondent pour une large part aux sections où existent des singularités, habitations, ou traversées et, donc, a priori sensibles au risque de dysfonctionnement ou de rupture.

1.3.5 LES MÉTHODES DE RENFORCEMENT

Les techniques de renforcement n'apparaissent pas homogènes sur l'ensemble de la Loire moyenne. Dans la partie amont, où les digues ont été construites à proximité du lit mineur, la technique

généralement utilisée est un renforcement côté val consistant à adoucir le talus aval par une recharge en alluvions sableuses non compactées. Un drainage de l'interface entre ancien et nouveau remblai est assuré et un drain de pied en matériaux granulaires est mis en place. La largeur à la base est ainsi portée à 8 fois la hauteur. La figure n°6 donne le principe de ce confortement sur le Val de Cosson (où il y a eu aussi un épaissement côté fleuve). Les photos 4 et 5 montrent le chantier de confortement de la levée du Val de Bou (novembre 1996), suivant cette technique. La photo 6 illustre un confortement achevé (levée rive gauche en amont d'Orléans).

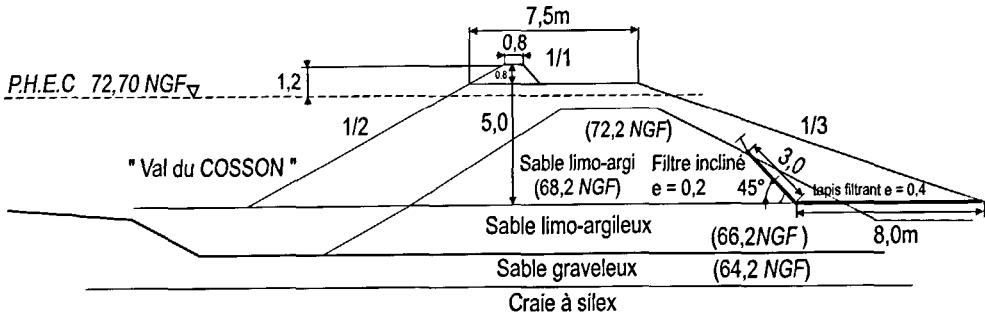


Figure 6 : Exemple de reprofilage et de drainage côté val, levée des Acacias (val de Cosson) - Projet LRPC de Blois.

Dans la partie aval (Indre-et-Loire en particulier), les confortements côté val sont rendus plus difficiles du fait de la présence de nombreuses habitations à proximité immédiate de la digue ou bien même intégrées à la digue. Le confortement est alors effectué côté fleuve avec mise en place d'une recharge en matériau le plus argileux possible. La figure n°7 donne la coupe type du confortement de la digue de protection de Fondettes-Luynes à l'aval de Tours. La photo 10 donne une vue du chantier (novembre 1996). Les photos 11 et 12 montrent un exemple de confortement du même type réalisé en 1998 sur une levée rive droite du Cher.

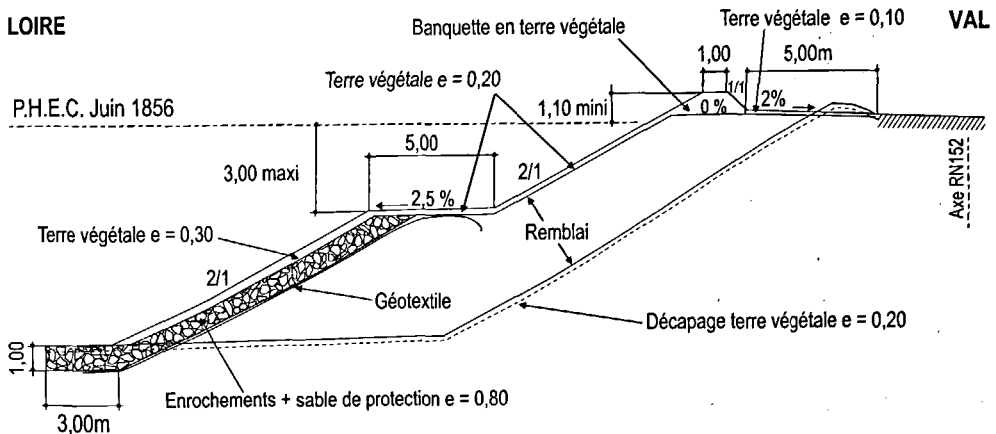


Figure 7 : Coupe-type du confortement côté fleuve de la levée de Fondettes-Luynes - Projet DDE Indre-et-Loire.

1.4 LES ACTIONS EN COURS DANS LE CADRE DU PLAN LOIRE GRANDEUR NATURE

La présente étude vise à établir une procédure pertinente et efficace de diagnostic et de surveillance de l'état des levées, que pourront utiliser les services gestionnaires des levées. L'Équipe pluridisciplinaire Plan Loire grandeur nature a entrepris par ailleurs un certain nombre d'actions concernant les levées de la Loire moyenne :

- une « *Étude de différents scénarios de gestion des crues exceptionnelles de la Loire moyenne et de ses affluents* » a été entreprise pour élaborer une stratégie optimale et robuste de gestion des crues exceptionnelles. Cette étude est fondée sur des modélisations unidimensionnelles et bidimensionnelles des écoulements en crue dans la Loire endiguée, ainsi que dans les vals, lorsque les déversoirs entrent en service. Cette étude a pour objectif d'établir une synthèse d'ensemble sur le fonctionnement hydraulique de la Loire pendant les crues fortes et exceptionnelles. Elle constituera la référence pour le calage topographique des levées et des déversoirs par rapport aux lignes de plus hautes eaux. Elle donnera également des informations sur les zones du système des levées les plus exposées au plan hydraulique ;
- une étude de synthèse des ruptures de levées a été effectuée dans le cadre d'un mémoire de D.E.A. à l'Université d'Orléans « *Approche géomorphologique des brèches dans les levées de la Loire entre le Bec d'Allier et Montjean* » - William Halbecq. Les résultats de cette étude sont synthétisés au chapitre 3, §3.1, ci-après ;
- des données de bases (topographie, photos aériennes...) ont été acquises.

Diverses études diagnostic de levées ont été lancées en 1996 par les différents services gestionnaires. Une synthèse de ces études et des enseignements méthodologiques que l'on peut en tirer est donnée au chapitre 2. On signalera en particulier l'étude réalisée par le CEBTP pour la mise au point d'une méthodologie de diagnostic des digues du Val d'Authion, à partir d'un tronçon test.

L'ensemble de ces études doit déboucher sur un programme cohérent de renforcement des levées de la Loire moyenne et de modernisation des déversoirs qui est un des points forts du Plan Loire grandeur nature.



Photo 1 : Déversoir de Jargeau (45) sur la levée de Loire rive gauche, vu depuis l'aval.



Photo 2 : Levée rive gauche de la Loire en amont d'Orléans (45) - profil large, voie de circulation en crête, proximité et courbe du lit mineur



Photo 3 : Levée d'Espagne en amont de La Charité-sur-Loire - profil assez étroit, simple chemin de service en crête.



Photo 4 : Chantier de renforcement côté val sur la levée du val de Bou (45) - tapis drainant recouvert d'un géotextile anti-contaminant.



Photo 5 : Chantier de renforcement côté val sur la levée du Val de Bou (45) - remblayage en cours du talus côté val sur le tapis drainant.



Photo 6 : Talus côté val renforcé sur la levée de Sandillon (45) - exutoire du tapis drainant.



Photo 7 : Affleurement d'un ancien perré de protection sur la berge de la levée rive droite du Cher à Savonnières (37).



Photo 8 : affleurement d'un ancien perré de protection sur la berge de la levée rive droite du Cher à Savonnières (37) - vue de détail de l'affouillement et du sous-cavage en pied.



Photo 9 : Murette de rehausse déstabilisée et inclinée côté Loire sur la levée rive droite du Val d'Authion (49).



Photo 10 : Chantier de renforcement côté Loire sur la levée rive droite de Fondettes-Luynes.



Photo 11 : Talus côté rivière renforcé sur la levée rive droite du Cher à Savonnières(37) - vue générale.



Photo 12 : Talus côté rivière renforcé sur la levée rive droite du Cher à Savonnières(37) - vue de détail du talus reprofilé et des enrochements affleurant en pied.



Photo 13 : Maison encastrée dans le talus côté Loire sur la levée du Val de Bou (45) - repère de crue en façade.



Photo 14 : Ouvrage vanné de traversée sur la levée du Val de Bou (45), vu depuis le val.



Photo 15 : Débouché de terrier de blaireau en sommet du talus côté val de la levée d'Espagne.



Photo 16 : Fontis sur une plage rive droite de la Loire, face à la levée du Val de Bou (45).

Chapitre 2

Analyse des études diagnostic récentes

2.1 RAPPEL DES CONCLUSIONS DES ÉTUDES SIMECSOL - NEDECO

Les études SIMECSOL - NEDECO ont été exclusivement orientées sur l'aspect géotechnique de la tenue des levées. Elles ont servi de base aux études de renforcement dans le cadre du plan de 1970.

Les deux paragraphes qui suivent passent en revue les principales conclusions de ces études dans le domaine des méthodes d'investigation et des solutions de confortement.

2.1.1 MÉTHODES D'INVESTIGATION

Ces études ont consisté en la réalisation de 3 sections de reconnaissances de 1 km dans le département du Loiret.

Les reconnaissances in situ ont consisté en :

- mesure de résistivité électrique ;
- sondages à la tarière à main ;
- prélèvements d'échantillons intacts et remaniés ;
- essais pressiométriques ;
- essais pénétrométriques.

Les essais de laboratoire ont porté sur l'identification des matériaux, des mesures de densité sèche et des mesures de résistance au cisaillement.

L'étude définit les facteurs essentiels de la tenue des digues :

- la perméabilité : plus la digue est perméable plus elle est vulnérable ;
- le degré de compacité : les densités sèches sont généralement faibles, traduisant le défaut de comptage des digues ;
- la granulométrie des remblais : l'absence d'une fraction limoneuse est un facteur de risque.

La méthodologie d'investigation préconisée au terme de ces études est principalement basée sur la prospection électrique systématique qui permet de faire une première classification. La méthode présente un excellent rendement pour un coût peu élevé.

Cette reconnaissance est utilement complétée par des sondages au pénétromètre statique ou dynamique, bien adaptés aux terrains sablo-graveleux.

La mesure des teneurs en eau et densité sèche en place à la sonde gamma est également préconisée.

2.1.2 MÉTHODES DE CONFORTEMENT

Suivant les conclusions de cette étude, qui apparaît essentiellement géotechnique, l'ouverture de brèches est due à l'apparition de résurgences sur le talus aval ou au pied de la levée plutôt qu'à un phénomène d'instabilité des talus par glissement. Ce résultat est en bon accord avec les enseignements tirés de l'analyse des brèches survenues lors des crues de 1846, 1856 et 1866. On note toutefois que les causes hydrauliques de rupture, qui apparaissent comme prépondérantes (surverse, érosion du talus par le courant...) ne sont pas abordées par l'étude SIMECSOL - NEDECO.

L'existence d'un gradient hydraulique excessif est considéré comme le facteur de risque principal du fait du caractère très érodable du matériau sableux des levées : l'élargissement de la levée sera donc la mesure principale retenue pour le confortement. La règle proposée est une largeur à la base égale à 8 fois la hauteur de la levée, correspondant approximativement, compte tenu de la largeur en crête, à des pentes de talus de 3H/1V (le règlement de Colbert fixait ce rapport à 6).

Si le confortement est effectué côté val, un filtre granulaire sur le parement aval permettra de contrôler le risque d'érosion interne. Une système de drainage évacue les eaux de percolation vers un fossé de pied. Cette solution a été largement mise en œuvre dans le département du Loiret.

La technique de renforcement par mise en place d'un écran étanche interne, en palplanches ou en parois moulées bentonite-ciment, est également envisagée comme solution possible. Comme la précédente, elle vise à contrôler les écoulements internes à l'intérieur de la levée et éviter la rupture par érosion interne. Ce type de solution n'a pas été mis en œuvre, si ce n'est en protection de pied de la levée du Val de Bou dans une zone karstique.

La technique de compactage par vibration (système Johann Keller) est mentionnée ; elle peut être envisagée pour les profils composés de sables et graviers. Elle n'a jamais été mise en œuvre sur les levées de la Loire.

Le renforcement par étanchement du parement amont est déconseillé du fait des risques d'instabilité par sous-pression à la décrue. Cette solution a cependant été largement mise en œuvre en Indre-et-Loire.

2.2 ÉTUDES DIAGNOSTIC RÉCENTES

Huit rapports d'étude, mis à notre disposition par l'Équipe pluridisciplinaire ou les services gestionnaires selon le cas, ont été examinés dans le cadre de nos travaux. Ces études sont récentes (1994 à 1996), à l'exception de celle du CETE de Rouen à Blois (prospection géotechnique par sondages en 1973), et couvrent un linéaire cumulé de digues de l'ordre de 70 kilomètres. Les principaux éléments issus de la relecture de ces rapports sont reportés dans un tableau de synthèse (en fin du présent chapitre).

Sont formulés ci-après nos commentaires et appréciations :

- à propos des diverses méthodologies de diagnostic mises en œuvre et des résultats obtenus ;
- au plan des enseignements que l'on peut tirer de ces exemples pour la définition d'une méthode-type de diagnostic.

2.2.1 MÉTHODOLOGIES MISES EN ŒUVRE ET RÉSULTATS

Les deux seuls cahiers des charges d'études que nous avons eu l'occasion de relire sont apparus très directifs quant à la méthodologie à appliquer par le prestataire (GEOTEC et ANTEA, 1996) : toutefois, ce ne fut peut-être pas la pratique générale.

Une recherche historique plus ou moins poussée a été conduite dans deux des études examinées (études HYDRATEC 1994 à Bréhémont et CETE 1995 à Authion). L'exploitation des documents anciens (plans, rapport DION,...), couplée avec celle de documents plus récents (photos aériennes, profils en long, sondages,...), a fourni des informations souvent primordiales sur l'évolution géomorphologique du lit de la Loire et, parfois, des indications sur la constitution du corps de digue.

Les supports topographiques utilisés et/ou établis au titre des études sont divers : au minimum un profil en long en crête et une série de profils en travers. Seules deux études ont pu bénéficier de l'apport d'un plan topographique de précision (1/500) de la levée.

L'inspection visuelle détaillée n'a pas été systématiquement réalisée : il lui a semble-t-il souvent été préféré une inspection rapide avec constitution d'un dossier photographique sur les désordres les plus significatifs ou représentatifs.

La plupart des études ont comporté, au titre des reconnaissances géotechniques, des sondages, parfois poursuivis jusqu'au substratum calcaire (atteint alors entre 8 et 15 mètres) et presque toujours accompagnés d'essais de caractérisation en laboratoire sur des échantillons intacts ou remaniés.

Les sondages ont généralement été mis à profit pour installer des piézomètres et pour effectuer des essais *in situ* : essais de perméabilité de type Lefranc (choix logique puisque la constitution à dominante sableuse des digues et de leur fondation expose a priori l'ouvrage à des défauts d'étanchéité) et essais pressiométriques (choix plus surprenant dans la mesure où les caractéristiques dimensionnelles - hauteur par rapport à largeur d'emprise - des digues et la nature des sols de fondation ne font pas particulièrement craindre des problèmes de tassement).

Des essais pénétrométriques, pourtant de prime abord bien adaptés à la reconnaissance des sols fins, n'ont été mis en œuvre que dans un seul cas.

Cinq études ont fait appel, en complément de la géotechnique, à des méthodes géophysiques : magnétotellurique (RMT) et électromagnétique (EM), pour l'essentiel. Le radar géologique n'a été utilisé que sur la « planche d'essai » de la levée d'Authion (étude CEBTP, 1996). Si les résultats issus de ces quelques exemples d'application ne paraissent pas globalement spectaculaires, il ne faudrait pas pour autant en conclure au manque d'intérêt des méthodes géophysiques, en particulier pour le repérage de singularités (vides, caves, traversées de canalisation).

Seule une étude comprend la réalisation d'un volet hydraulique important : il s'agit de l'étude HYDRATEC sur la levée de Bréhémont. A contrario, la composante géotechnique n'y est que très peu développée. L'approche hydraulique et géomorphologique a ici grandement contribué à la mise en évidence des secteurs de digue à la sécurité précaire (et, par voie de conséquence, à l'élaboration du phasage des travaux). Par contre, la faiblesse du volet géotechnique n'a permis qu'une justification et un dimensionnement sommaires des travaux de confortement.

La plupart des études, enfin, aboutissent à la définition des principes de confortement et d'un ordre de priorité pour les travaux. Le prédimensionnement des ouvrages à créer est, cependant, très diversement traité et leur chiffrage n'est pas systématique. Aussi, notre appréciation globale est que ces études n'atteignent pas, ou que partiellement, le stade « Avant-Projet Sommaire » des travaux à réaliser.

Au plan des coûts unitaires des études elles mêmes, la fourchette varie entre 75 000 F (étude GEOTEC 1996) et 140 000 F TTC (études ANTEA 1996) du kilomètre, y compris la topographie (sommaire) et les sondages géotechniques. Le prix de revient tombe à moins de 20 000 F du kilomètre pour les études (SOGREAH 1996 et HYDRATEC 1994) où la topographie et la géotechnique sont exclues du décompte. L'étude CEBTP sur la levée de l'Authion (600 000 F TTC du kilomètre !) est à mettre à part du fait de son caractère méthodologique.

2.2.2 QUELS ENSEIGNEMENTS TIRER DE CES EXEMPLES ?

Le paragraphe précédent peut se résumer au constat d'une certaine disparité des méthodologies appliquées jusqu'à présent en vue du diagnostic des levées de la Loire moyenne et, en conséquence, des prix de revient des études. Pourtant, il semble que les principaux objectifs des commanditaires de ces études aient été les mêmes, à savoir :

- disposer d'un diagnostic de sécurité de la levée vis-à-vis d'une crue de même ampleur que celles de la fin du XIX^e siècle ;
- définir, justifier, phaser et évaluer les travaux de confortement ou d'aménagement nécessaires pour assurer un niveau de sécurité satisfaisant.

Un tel constat justifie pleinement la réflexion méthodologique qui fait l'objet de la présente étude initiée par l'Équipe pluridisciplinaire Plan Loire grandeur nature. En outre, l'harmonisation des méthodes de diagnostic et de suivi des levées constitue maintenant un besoin fort, exprimé par les services gestionnaires.

En vue de la mise au point de la méthodologie idéale de diagnostic, les éléments suivants se dégagent de l'expérience accumulée lors des études antérieures (et plusieurs de ces éléments ont d'ailleurs été soulignés par les prestataires de service eux-mêmes) :

- intérêt de la recherche préalable d'archives (localisation des brèches anciennes ou des secteurs à fortes sollicitations hydrauliques, évolution du profil en long et du tracé en plan du lit mineur, ...)
- apport crucial d'une topographie de précision aussi bien pour le diagnostic initial (caractéristiques externes de la levée, premier inventaire des singularités, report des désordres, ...) que pour le suivi ultérieur de la digue ;
- caractère indispensable d'une inspection visuelle détaillée à pied ;
- contribution potentielle des méthodes géophysiques à condition de les appliquer en complément - et non en remplacement - des autres moyens de reconnaissance et de choisir le dispositif le plus adapté à la nature des sols et à l'objectif recherché : à ce propos, une application à titre expérimental des différentes méthodes géophysiques sur un tronçon de levée où l'on sait qu'il existe des singularités¹ permettrait d'évaluer et de comparer, en site connu, leurs performances respectives ;
- nécessité de prendre en compte, dans le diagnostic, les aspects hydrauliques et morphodynamiques qui permettent souvent d'expliquer les ruptures historiques impulsées par le fleuve ;
- intérêt, enfin, de fixer à l'étude de diagnostic l'objectif d'aboutir à la définition et à la justification des travaux nécessaires au moins jusqu'au stade Avant-Projet Sommaire : ce qui permet, dès le terme de l'étude, d'arrêter les principaux choix d'aménagement et d'élaborer les programmes de financement.

Il apparaît donc que, contrairement à la tendance semble-t-il privilégiée jusqu'à présent, les reconnaissances géotechniques ne doivent constituer qu'une composante de « l'étude idéale » et non écraser tous les autres aspects (topographie, reconnaissance pédestre, hydraulique, ...) dont la contribution se révèle finalement fondamentale à la pertinence du diagnostic.

On notera également que, si la présence presque systématique d'une route sur la crête de digue autorise un accès facile au moins aux parties supérieures de l'ouvrage, l'intensité de la circulation qui

1 L'étude comparative menée par le CEBTP sur un tronçon de levée du Val d'Authion trouve ses limites dans la relative homogénéité du secteur concerné.

y règne constitue souvent une gêne sérieuse au déroulement de toutes les opérations de terrain réalisées dans le cadre du diagnostic.

En terme de coûts, enfin, il est intéressant de comparer les budgets d'étude de diagnostic (de l'ordre de 100 000 F / km) à ceux des travaux réalisés (par exemple, 5 000 000 F / km sur la levée du Val de Bou dans le Loiret pour le confortement-type par recharge aval) ou préconisés (5 300 000 F / km en moyenne pour les travaux à effectuer sur la levée de Bréhémont en conclusion de l'étude HYDRATEC). Le ratio, bien qu'indicatif, de 2% auquel aboutit une telle comparaison permet bien de relativiser le poids des études préalables dans l'ensemble du budget des opérations.

2.2.3 TABLEAU COMPARATIF DES ÉTUDES RÉCENTES RÉALISÉES POUR LE DIAGNOSTIC DES LEVÉES DE LA LOIRE

Voir ci après pages 40 à 48.

TABLEAU COMPARATIF DES ETUDES RECENTES REALISEES POUR LE DIAGNOSTIC DES LEVEES DE LA LOIRE

Levée	Longueur	Méthode générale	Reconnaitances par forages et essais in-situ								
			Forages carottés		Forages équipés en piézomètres		Forages destructifs		Pressiomètre	Essai Lefranc	Pénétromètre
			Nombre	Profondeur	Nombre	Hauteur crépinée	Nombre	Profondeur	Nombre	Nombre	Nombre
Chatillon/Loire (58)	4,8 km	<ul style="list-style-type: none"> . Topographie avec profil en long en crête et profils en travers tous les 200 m . Examen visuel sans report détaillé . Reconnaissance géophysique RMT . Forages carottés ou destructifs avec essais Lefranc et essais pressio . Essais d'identification et mécaniques en laboratoire 	10	7 m en moyenne	4	totale	11	6 à 10 m	33	a 2,5	
Saint-Firmin/Loire et la Mothe (45)	3,37 km	idem	8	6 à 10 m	3	totale	7	7 à 10 m	32	environ 20	
Rive droite du Cher (37)	15,2 km	<ul style="list-style-type: none"> . Compression du profil en long avec les PHEC . Etude des fosses 	10								

a : moyenne par sondage

Levées de Chatillon-sur-Loire (58), de Saint-Firmin-sur-Loire et La Mothe (37) et de la rive droite du Cher (37).
(Tableau 1/3).

TABLEAU COMPARATIF DES ETUDES RECENTES REALISEES POUR LE DIAGNOSTIC DES LEVEES DE LA LOIRE

Levée	Longueur	Reconnaisances par méthodes géophysiques				Essais de laboratoires									
		Electro- magnétique	Résistivité	Méthodes électriques	Radar	Identification						Essais mécaniques			
						W	gd	Granulo	IP	CaCO3	m.o.	VBS	Cisaillement	Triaxial	oedomètre
Chatillon/Loire (58)	4,8 km		Résistivité magnéto- tellurique (RMT) . Un profil en crête . un profil en pied aval de digue . un profil en pied côté fleuve			17	11	11	3	12	10	8	7 (f60 mm)	5 (f 35 mm)	7
Saint-Firmin/ Loire et la Mothe (45)	3,37 km		idem			17	9	8	4	9	9	4	4	3	
Rive droite du Cher (37)	15,2 km	Appareil EM31													

Levées de Chatillon-sur-Loire (58), de Saint-Firmin-sur-Loire et La Mothe (37) et de la rive droite du Cher (37).
(Tableau 2/3).

TABLEAU COMPARATIF DES ETUDES RECENTES REALISEES POUR LE DIAGNOSTIC DES LEVEES DE LA LOIRE

Levée	Longueur	Topographie	Inspection visuelle	Rech. historiq.	Commentaires	B.E.T.	Coût TTC	Conclusions et recommandations
						(Date)		
. Chatillon/Loire (58)	4,8 km	Un profil en long sur crête de digue (1 pt/25 m) et un profil en travers tous les 200 m environ Comparaison avec les lignes d'eau de l'étude SOGREAH	Visite du site par deux personnes - observation des anomalies - pas de report des observations détaillées Modélisation des infiltrations en crue pour dimensionner les moyens de pompage côté val	Néant sauf PHE connues	Cahier des charges très précis ayant orienté la méthodologie. Bordereau de prix avec quantités fixées	ANTEA (juin 1996) + GEOSCOPI (pour RMT)	1 228 kF y/c topo et sondages	- Digue constituées de sable argileux sur alluvions sablo-graveleuses et substratum de craie à plus de 8 m sous la crête de digue. - Stabilité de digue insuffisante sur 750 m (==> confortement par recharge amont en sable, recharge aval sur tapis drainant et protection de pied amont en enrochements). - Ouvrages ponctuels en maçonnerie dégradés ==> réparation
. Saint-Firmin/ Loire et la Mothe (45)	3,37 km	Comparaison avec les lignes d'eau de l'étude SOGREAH	Idem	Néant sauf PHE connues	Etude de stabilité limitée au talus côté fleuve	ANTEA (juin 1996)		- Digue hétérogènes - matériaux sableux en fondation ==> infiltrations importantes en crue et inondations du bourg ==> pompage dimensionné à 100 m ³ /s - Rehaussement de la digue de la Motte (+ 0,5 à + 0,7 m, soit revanche 0,20 m (1866) - Risques d'érosions de pied côté fleuve ==> Protections en enrochements sur zone exposée
. Rive droite du Cher (37)	15,2 km	- Fond de plan au 1/5000é préexistant - Bathymétrie du Cher fournie ...				SOGREAH	220 kF (hors topo et géotech)	

Levées de Chatillon-sur-Loire (58), de Saint-Firmin-sur-Loire et La Mothe (37) et de la rive droite du Cher (37).
(Tableau 3/3).

TABLEAU COMPARATIF DES ETUDES RECENTES REALISEES POUR LE DIAGNOSTIC DES LEVEES DE LA LOIRE

Levée	Longueur	Méthode générale	Reconnaitances par forages et essais in-situ								
			Forages carottés		Forages équipés en piézomètres		Forages destructifs		Pressiomètre	Essai Lefranc	Pénétromètre
			Nombre	Profondeur	Nombre	Hauteur crépinée	Nombre	Profondeur	Nombre	Nombre	Nombre
. Bec d'Allier	2 km	. Topographie avec profil en long et crête et profils en travers tous les 200 m	4 (vibro percussion)	7,5 m	2	5,5 m	4	8 à 15 m	12	12	
. Rauches	3,7 km	. Examen visuel avec report sur le profil en long	7 (vibro percussion)	7,5 m	3	5,5 m	8	5 à 12 m	26	21	
. Espagne (58)	9,3 km	. Reconnaissance électro-magnétique . Forages carottés ou destructifs avec essais Lefranc et essais pressio . Essais de laboratoire (identification et essais mécaniques)	19 (vibro percussion)	7 à 9,5 m	11	5 à 7,5 m	20	9 à 16 m	88	42	
. La Chapelle-aux-Naux Ile Saint-Martin (37)		. Visite détaillée du terrain . Compléments au modèle hydraulique 1986 . Mise en évidence de zones où une surélévation de la levée est nécessaire	env.90% de récupération								
. Blois - Vienne et Bas Rivière (41)	plusieurs km	Reconnaissance par forages des levées et leur fondation	6	10-15 m ? (substratum atteint)	6	double piézomètre	80 (tarière)	5 - 10 m ? (sur 49 profils)		oui (au moins 1 par sondage ?)	

Levées de Bec d'Allier, Rauches et Espagne (58), de La Chapelle-aux-Naux Ile Saint-Martin(37) et de Bois-Vienne et Bas Rivière (41). (Tableau 1/3).

TABLEAU COMPARATIF DES ETUDES RECENTES REALISEES POUR LE DIAGNOSTIC DES LEVEES DE LA LOIRE

Levée	Longueur	Reconnaitances par méthodes géophysiques				Essais de laboratoires									
		Electro- magnétique	Résistivité	Méthodes électriques	Radar	Identification						Essais mécaniques			
						W	gd	Granulo	IP	CaC03	m.o.	VBS	Cisaillement	Triaxial	oedomètre
. Bec d'Allier	2 km	Appareil Géonics EM31				6	5	5		4	3	4	4		1
. Rauches	3,7 km	. un profil en côte											3		
. Espagne (58)	9,3 km	. un profil en pied aval											10	4	2
. La Chapelle- aux-Naux Ile Saint-Martin (37)															
. Blois - Vienne et Bas Rivière (41)	plusieurs km							oui (nb?)							

Tracés de Bec d'Allier Rauches et Espagne (58) de LaChapelle-aux-Naux Ile Saint-Martin(37) et de Bois-Vienne et Bas Rivière (41). (Tableau 2/3).

TABLEAU COMPARATIF DES ETUDES RECENTES REALISEES POUR LE DIAGNOSTIC DES LEVEES DE LA LOIRE

Levée	Longueur	Topographie	Inspection visuelle	Rech. historiq.	Commentaires	B.E.T.	Coût TTC	Conclusions et recommandations
						(Date)		
. Bec d'Allier . Rauches . Espagne (58)	2 km 3,7 km 9,3 km	Un profil en long sur crête de digue et un profil en travers tous les 200 m environ Comparaison avec les lignes d'eau de l'étude SOGREAH	- couverture végétale - plan de la digue - terriers, affaissements... - ouvrages - report sur profils en long	Néant	Cahier des charges très précis ayant orienté la méthodologie. Bordereau de prix avec quantités fixées	GEOTEC et CSD AZUR (août 1996)	1 143 kF y/c topo et sondages	Digues constituées de sables propres, plus rarement de limons sableux. Infiltrations modérées au travers des digues, mais val non fermé à l'aval. Risques d'affouillements (==> surveillance et entretien de la végétation). Risques localisés d'instabilités (==> contre filtre enrochements sur géotextile en pied côté fleuve). Terriers (==> évacuation des fousseurs).
. La Chapelle-aux-Naux Ile Saint-Martin (37)		Etudes menées en parallèle - profil en long - 74 profils en travers (un tous les 200 m) - 9 levés bathymétriques	Visite de terrain axée en particulier sur : - zones à risque d'érosion - points bas de la levée - zone de mauvais drainage - emprises pour le réaménagement Rapport photo commenté	Cartes du 19 ^e siècle et comparaison avec photos aériennes à diverses dates Evolution morphologique en plan et en profil en long	Très peu de géotechnique Pas de calculs de stabilité	HYDRATEC (juin 1994)	220 kF (hors sondages et topo)	Plusieurs zones submersibles pour des débits inférieurs à ceux submergeant les déversoirs ==> rehausse de la digue ou seulement de la banquette. Vulnérabilité du talus exposé au courant pour levées proches du lit mineur ==> Protection par enrochements Fragilité du talus côté fleuve en lit majeur ==> Protection en argile végétalisée
. Blois - Vienne et Bas Rivière (41)	plusieurs km				Etude réalisée dans le cadre d'un projet de nouvelle levée entre la Loire et le Cosson	CETE Rouen - L.R. Blois (octobre 1973)		

Levées de Bec d'Allier, Rauches et Espagne (58), de La Chapelle-aux-Naux Ile Saint-Martin(37) et de Bois-Vienne et Bas Rivière (41). (Tableau 3/3).

TABLEAU COMPARATIF DES ETUDES RECENTES REALISEES POUR LE DIAGNOSTIC DES LEVEES DE LA LOIRE

Levée	Longueur	Méthode générale	Reconnaitances par forages et essais in-situ								
			Forages carottés		Forages équipés en piézomètres		Forages destructifs		Pressiomètre	Essai Lefranc	Pénétromètre
			Nombre	Profondeur	Nombre	Hauteur crépinée	Nombre	Profondeur	Nombre	Nombre	Nombre
. Authion (49)	47,8 km	Etude de diagnostic de la levée du Val d'Authion (RD de la Loire): - étude des archives (DION et études antérieures) - reconnaissances géotechniques - analyse descriptive de l'état de la levée - proposition de confortement selon niveaux de crue et degrés d'urgence (synthèse au 1/25 000)					10 (tarière 100 à 200 mm)	8 à 8,5 m			
. Authion (49)	0,5 km	Essai d'une méthodologie sur une section-test : . Topographie : plan au 1/500 . Inspection visuelle de surface et subaquatique . Reconnaissances géophysiques : électrique, radar, EM et RMT . Pénétromètre statique avec piézocône . Sondages à la tarière 2ème phase (oct. 96) : . Analyse critique des méthodes d'investigation . Modélisation de la digue . Etude (quantitative) des risques de rupture : nature, probabilité d'occurrence, parades envisageables . Propositions pour la suite des études			6	?	6 (tarière 100 mm)	7 à 10 m		2	15 au pénétromètre statique avec piézocône (prof 8 à 9 m)

Levées d'Authion (49). (Tableau 1/3).

TABLEAU COMPARATIF DES ETUDES RECENTES REALISEES POUR LE DIAGNOSTIC DES LEVEES DE LA LOIRE

Levée	Longueur	Reconnaitances par méthodes géophysiques				Essais de laboratoires										
		Electro-magnétique	Résistivité	Méthodes électriques	Radar	Identification						Essais mécaniques				
						W	gd	Granulo	IP	CaCO3	m.o.	VBS	Cisaillement	Triaxial	oedomètre	
. Authion (49)	47,8 km					35 (sur 5 sondages)										
. Authion (49)	0,5 km	EM 31 : 2 ou 3 profils en long sur chaque flanc	RMT : 2 profils en long en crête de part et d'autre chaussée, avec 2 fréquences	6 panneaux électriques dans le sens de la voie en tête de talus côté Val	4 profils en long et 1 profil transversal	3	3	?					3 = Cuu /fuu		3 (Kh + Kv)	

Levées d'Authion (49). (Tableau 2/3).

TABLEAU COMPARATIF DES ETUDES RECENTES REALISEES POUR LE DIAGNOSTIC DES LEVEES DE LA LOIRE

Levée	Longueur	Topographie	Inspection visuelle	Rech. historiq.	Commentaires	B.E.T.	Coût TTC	Conclusions et recommandations
						(Date)		
. Authion (49)	47,8 km	Travail sur fonds peu précis existants (1/25 000 au 1/10 000) Profils en travers estimés (?)	Reconnaissance visuelle rapide (une douzaine de journées de terrain) Report des zones de fuite relevées par les gestionnaires lors de la crue de janvier 1994	Examen des archives (DION) et des études antérieures (en particulier 22 sondages de profondeurs comprises entre 5 et 9 m)	Etudes de diagnostic rapide : - pas d'inspection visuelle détaillée - évaluation uniquement qualitative des risques (pas d'étude de stabilité) - pas d'étude hydraulique - dimensionnement sommaire	CETE Ouest L.R. Angers (janvier 1995)	290 kf	Pour le niveau de crue exceptionnel (#Q50-Q100), travaux de première urgence recommandés : . confortement/reconstitution de la murette sur tout le linéaire (47,8 km) . butée de pied côté Loire sur 41,5 km (dont 18 km en site fluvial) . massif de drainage du pied de talus côté Val (32 km) . écran d'étanchéité sur 0,3 km (Gaude)
. Authion (49)	0,5 km	Plan topographique au 1/500 avec profils en travers tous les 50 m			Etude-test réalisée sur une planche d'essai de 500 ml en vue de définir la méthode de diagnostic à appliquer sur le reste de la levée (47 km)	C.E.B.T.P. (septembre et octobre 1996)	300 kf (TTC ?) hors topo	Rapport de septembre 96 : Les conclusions provisoires de l'étude sur la section-test sont : . homogénéité longitudinale . mise en avant des méthodes EM et RMT . intérêt de l'inspection visuelle Rapport d'octobre 96 : . Plan de travail proposé : - recueil de données : historique, travaux et hydraulique - levée topo au 1/500 - inspection visuelle à pied - prospection géophysique par EM31 et RMT - calage par sondages au pénétromètre statique (1 sondage/500 m) - 15 profils équipés en piézomètres (3) - sondages ponctuels

Levées d'Authion (49). (Tableau 3/3).

Chapitre 3

Les mécanismes de dégradation et de rupture

3.1 ANALYSE HISTORIQUE DES RUPTURES

Deux documents permettent de recueillir une vue synthétique des données disponibles sur les ruptures des digues. Il s'agit de l'ouvrage de R. DION et d'une étude récente réalisée par William HALBECQ de l'Université d'Orléans⁶.

Ce travail de stage de DEA a été encadré par Mme E. GAUTIER, Professeur de Géographie physique de l'université d'Orléans et M. J.N. GAUTIER de l'Équipe pluridisciplinaire Loire grandeur nature.

Sur la base d'une recherche d'archives très approfondie, l'étude s'intéresse aux brèches survenues lors des trois grandes crues du XIX^e siècle (1846, 1856 et 1866) et porte sur les levées de la Loire entre le Bec d'Allier et Montjean (soit 400 km de levées). Ce travail a permis de répertorier et de localiser précisément 337 brèches survenues lors des trois crues, se répartissant ainsi :

- Crue de 1846 : 103 ;
- Crue de 1856 : 149 ;
- Crue de 1866 : 85.

La plus grande brèche mise à part (1,7 km de longueur en aval de Gien en 1846), la longueur moyenne de l'ensemble des brèches répertoriées est de 190 m. On observe sur les moyennes par secteur, une tendance assez nette à la diminution de la longueur des brèches de l'amont vers l'aval.

191 brèches ne se sont produites qu'une seule fois lors des trois crues et 66 brèches se sont produites deux ou trois fois sur le même site. Ce dernier point est bien sûr lié au fait que les mêmes causes ont eu tendance à produire les mêmes effets ; mais il faut également le mettre en relation avec la mauvaise qualité avérée des réparations des levées jusqu'avant la crue de 1856 :

- Aucun travail en profondeur n'est effectué sur les zones de brèches ou de tassement des levées. Ainsi, les réparations de brèches consistent en un comblement de l'ouverture par de la terre et, le plus souvent, par les matériaux issus des portions de levées voisines (Dion, Les levées de la Loire).

- La méthode la plus courante consiste à reprendre, lorsque c'est possible, les matériaux enlevés par le fleuve, ou à prélever les matériaux à la base du talus côté Loire à proximité immédiate de la brèche. On réduit alors la taille de l'appui de la portion saine qui devient à son tour une portion à risque. De plus, le prélèvement du côté Loire conduit à utiliser des graves et du sable dans la reconstruction (Halbecq, Approche géomorphologique des brèches dans les levées de la Loire).

En ce qui concerne leur localisation géographique, les deux tiers du linéaire des brèches ont été concentrés sur le secteur compris entre Gien et l'aval de Blois, ce qui a contribué à diminuer les hauteurs d'eau en aval et donc les sollicitations sur les digues au-delà de Blois. On peut donc, a contrario, conclure que le renforcement des levées en amont de Blois se traduira, toutes choses égales par ailleurs, par une surélévation des lignes d'eau en aval.

Avant d'analyser les causes des brèches, il convient de décrire rapidement les trois crues.

⁶ « Approche géomorphologique des brèches dans les levées de la Loire (William HALBECQ - 1996) »

La crue d'octobre 1846 survient brutalement après une période d'étiage marqué. Son débit maximal est estimé à 6 900 m³/s au Bec d'Allier. Les levées ne sont alors pas équipées de banquettes, ce qui les rend plus exposées à la surverse.

La crue de début juin 1856 a été précédée par trois crues significatives en mai qui ont déjà causé au moins deux brèches. Les levées sont donc partiellement saturées et ont pu être localement affaiblies par des phénomènes d'infiltration. Plusieurs brèches se forment d'ailleurs avant même l'arrivée de la pointe de crue estimée à 7 250 m³/s. Parallèlement, une crue du Cher, dont le maximum a été atteint à Tours la veille de la pointe de la Loire, est venue renforcer l'ampleur des sollicitations sur les digues.

La crue de septembre 1866 survient, comme celle de 1846, après une période d'étiage. Il s'agit d'une crue brutale présentant un hydrogramme pointu culminant à 7 500 m³/s. Selon les sections, elle a entraîné des hauteurs d'eau plus ou moins élevées que la crue de 1856.

Les causes directes des ruptures de digues analysées sur l'ensemble des trois crues sont les suivantes :

- surverse du fleuve vers le val : 47,9 % ;
- surverse ou rupture du val inondé vers le fleuve : 17,9 % ;
- rupture de la banquette : 15,4 % ;
- renard dans le corps de la levée : 4,7 % ;
- érosions de talus et affouillements : 4,5 % ;
- autres causes ou cause indéterminée : 9,6 %.

La part des ruptures par surverse du fleuve vers le val et de celles par rupture de la banquette évoluent en sens inverse entre les 3 crues, puisque les banquettes ont été essentiellement construites suite à la crue de 1846. Ainsi, pour cette première crue, la surverse directe est à l'origine de près de 60 % des brèches, ce pourcentage tombant à 42 % en 1856 et 37 % en 1866. Deux tiers des cas de surverse ont pu être mis en relation avec l'existence préalable d'un point bas dans le profil en long de la levée.

Un point intéressant analysé dans l'étude porte sur l'orientation de la levée par rapport au sens du courant, dans les zones des brèches :

- levée quasi perpendiculaire au flux : 14 % ;
 - rive concave dans une courbe du fleuve : 16 % ;
 - rive convexe dans une courbe du fleuve : 12 % ;
 - levée parallèle au fleuve dans zone rectiligne : 40 % ;
 - brèches en retour (val vers fleuve) : 18 %.
- } 30 %

Ainsi, 30 % des ruptures se sont produites dans des zones où la position de la levée, par rapport à l'écoulement principal, apparaît très défavorable. De telles zones ne représentent qu'une faible part du linéaire des levées, mais elles sont le siège de phénomènes hydrauliques très perturbateurs (accélération locale de la vitesse, surélévations de la ligne d'eau, courants hélicoïdaux et donc érosions), qui rendent ces zones très vulnérables.

Deux autres résultats de l'étude confirment la nécessité d'accorder une attention toute particulière aux facteurs morphologiques :

- 72 % des brèches se sont produites à l'amont proche ou au niveau de rétrécissements de la largeur entre levées (brèches en retour mises à part) ;

- 55,5 % des brèches se sont produites dans des zones où la levée est implantée directement au bord du lit mineur (brèches en retour mises à part).

3.2 MÉCANISMES POTENTIELS DE DÉGRADATION ET DE RUPTURE

3.2.1 SURVERSE

Il s'agit de la première cause identifiée de rupture. Lors des trois crues du milieu du XIX^e siècle, elle a été à l'origine de près de la moitié des brèches, sans compter les surverses en retour des vals vers le fleuve. Dans plus des deux tiers des cas de surverse, on a pu identifier un point bas sur le profil en long de la levée qui a induit la concentration des débits. Des surélévations de la ligne d'eau sur la rive concave des courbes du fleuve peuvent également être mises en avant.

On ne dispose toutefois pas de données suffisamment précises pour évaluer la hauteur et la durée des lames d'eau ayant déclenché l'érosion régressive et l'ouverture des brèches (ou, si ces données existent, elles n'ont pas été exploitées).

S'il s'avérait que les données historiques des crues de la Loire permettaient de disposer de données sur les hauteurs et durées de surverse avant ouverture des brèches, il serait intéressant de les exploiter car il s'agit là d'un sujet sur lequel peu de données quantitatives existent. On pourrait alors disposer de quelques éléments de réponse à la question : *Que sont capables de supporter les digues en matière de surverse ?*

Notre actuelle ignorance nous conduit à apporter une réponse conservatoire : **les levées ne supportent pas la surverse**. Le caractère localement plus ou moins sableux des matériaux et l'hétérogénéité dans la compacité nous incitent d'ailleurs à une telle prudence.

3.2.2 RUPTURES EN RETOUR

Ce mode de rupture a représenté 18 % des causes de brèches du XIX^e siècle, cette proportion étant globalement stable d'une crue à l'autre. En fait, sous ce mode de rupture sont rassemblés sans distinction deux phénomènes de nature différente :

- la surverse lorsque le niveau de l'eau en partie aval du val dépasse le niveau de la levée ; l'érosion régressive qui s'en suit est d'autant plus rapide que le flot se déverse sur un talus saturé par plusieurs jours d'imbibition ;
- la rupture du talus saturé côté fleuve lors de la décrue de ce dernier, sous le double effet de la poussée des eaux côté val et de la vidange « rapide » côté fleuve.

Le premier type conduit à des ruptures qui se produisent au plus fort du remplissage des vals : la brèche réintroduit dans le fleuve d'importants débits qui en avaient été détournés plus en amont, ce qui augmente d'autant la crue en aval. A contrario, le deuxième type se produit alors que la décrue du fleuve est déjà bien avancée et les débits réintroduits par les brèches sont a priori moins dommageables que dans le premier cas.

3.2.3 RUPTURE DES « BANQUETTES »

Un peu avant, mais surtout après la crue de 1846, on a surélevé artificiellement les digues en construisant une « banquette » sur le bord du couronnement côté fleuve. Il s'agit en général d'une levée de terre étroite

et à pentes raides (largeur en crête d'environ 0,50 m et pentes d'environ 1,5H/1V) ou bien d'un muret en maçonnerie de 0,3 à 0,5 m d'épaisseur. La hauteur de cette banquette peut atteindre, voire dépasser 1,0 m. La liaison entre la banquette et la digue préexistante constitue un point de faiblesse, en particulier sur le plan hydraulique avec risque d'écoulements privilégiés entraînant érosion, renard et effondrement de la banquette.

Mais c'est également la stabilité mécanique de ces banquettes qui apparaît très fragile, que ce soit du fait du profil insuffisant et des faibles caractéristiques mécaniques des banquettes probablement mal compactées, ou que ce soit du fait des fondations insuffisantes des murs en maçonnerie qui présentent, en certains points, des signes manifestes de désordres (fissures, inclinaison vers le fleuve...), phénomènes souvent aggravés, voire déclenchés, par les surcharges routières (cf. photo 9).

Sans distinction précise du mécanisme en cause (renard ou instabilité d'ensemble), la rupture des banquettes a été à l'origine de plus de 19 % des brèches lors de la crue de 1856 et de 24 % des brèches lors de la crue de 1866. Il s'agit donc d'un point majeur de la vulnérabilité des levées actuelles, en tout cas dans les tronçons où cette banquette n'a pas fait l'objet de confortements au cours de ces dernières décennies.

3.2.4 ÉROSION DE TALUS ET AFFOULEMENTS

Les talus des levées côté fleuve subissent, en crue, les effets des courants hydrauliques qui peuvent provoquer des érosions à la base des talus. Il en résulte un raidissement de la pente locale qui, associé à l'affaiblissement des caractéristiques mécaniques (du fait de la saturation des matériaux), entraîne alors des glissements en masse qui deviennent à leur tour le siège de courants hélicoïdaux particulièrement agressifs. Par ruptures successives du talus amont, on peut ainsi aboutir à l'ouverture d'une brèche dans la levée, le phénomène de surverse accélérant la dynamique de dégradation dès que la banquette, en crête de levée, est emportée.

Pour les trois crues du siècle dernier, 15 brèches (soit 4,5 %) ont pu être formellement reliées à ce mécanisme de rupture.

Les facteurs de vulnérabilité à ce type de dégradation sont de trois ordres :

- vitesse moyenne de l'eau le long de la levée, qui est liée à la distance de la levée par rapport au lit mineur. De ce point de vue, les levées en bord immédiat du lit mineur sont particulièrement exposées (cf. exemples sur photos 2 et 11), ainsi que les levées situées dans des zones de rétrécissement de la largeur du lit majeur ;
- perturbations hydrauliques locales pouvant entraîner des courants et tourbillons avec des vitesses locales plus élevées que la vitesse moyenne du tronçon. Ainsi des arbres, des piles ou toute construction sur le parement amont des levées sont la source de telles discontinuités hydrauliques. Il en va de même pour des courbes prononcées dans l'axe de la levée ;
- nature et état de la protection du talus de la levée côté fleuve. Ainsi, un perré en bon état est réputé pouvoir résister à une vitesse moyenne de 4 m/s, alors qu'un talus simplement enherbé supportera des vitesses ne dépassant pas 1,5 m/s. Le changement de nature de la protection (passage d'une zone de perré à une zone enherbée) constitue un fort facteur de vulnérabilité.

Les phénomènes de dégradation par érosion peuvent également se produire côté val, mais a priori uniquement à proximité des déversoirs (vitesses élevées en début de déversement), ou bien près des zones de brèches ouverte (mais la localisation est plus difficilement prévisible...).

3.2.5 RENARD HYDRAULIQUE

Les hétérogénéités de perméabilité dans le corps de la levée peuvent être à l'origine de zones de circulation préférentielle de l'eau lorsque la levée est exposée à la crue. Selon la vitesse de l'eau et la nature des matériaux, on peut obtenir localement le gradient hydraulique critique qui provoque l'érosion du sol, créant progressivement un conduit le long duquel le gradient et la vitesse augmentent avec le temps. L'amplification du phénomène peut aller jusqu'à la création d'une galerie à travers la levée puis d'une brèche par effondrement.

Ce phénomène a été identifié comme étant à l'origine de 16 brèches (soit 4,7 %) lors des crues de la Loire du siècle dernier. Dans la moitié des cas (9 sur 16), ces brèches se sont produites au niveau d'une jonction remblai / ouvrage.

A titre de comparaison, pour les crues du Rhône de 1993 et 1994, ces phénomènes sont à l'origine de la totalité des 16 brèches constatées sur les digues de Camargue :

- 13 cas de terriers d'animaux ;
- 3 cas de traversées de canalisations.

Les principaux facteurs de vulnérabilité vis-à-vis de ce mécanisme de dégradation sont les suivants :

- mauvaise étanchéité à la jonction entre remblais et ouvrages transversaux. Les maisons construites dans l'emprise des levées (cf. photo 13) sont incontestablement un facteur de risque, ainsi que les canalisations et galeries traversant la levée (cf. photo 14) ;
- excavations ou galeries dans la levée réduisant ainsi la longueur du chemin hydraulique entre l'amont et l'aval. Dans cette catégorie, il faut bien sûr ranger les terriers d'animaux fouisseurs (cf. photo 15) et les racines d'arbres morts, mais surtout, encore une fois, les constructions dans l'emprise des levées (cf. photo 13) ;
- hétérogénéité dans les couches de matériaux constitutifs du remblai ou de la fondation. Le risque est d'ailleurs probablement plus au niveau de la fondation, constituée de dépôts alluviaux à granulométrie variable et qui n'a, sauf exception, jamais fait l'objet d'un traitement particulier. A cette catégorie, on peut rattacher les phénomènes de fontis observables par exemple sur le Val de Bou (fondation karstique : cf. photo 16).

3.2.6 INSTABILITÉ D'ENSEMBLE DE LA LEVÉE

Le profil des levées leur confère en général une stabilité d'ensemble qui est assez largement assurée dans tous les cas de charge.

Par ailleurs, aucune brèche du siècle dernier n'a été formellement reliée à une rupture brutale de la levée, si ce n'est peut être la rupture de la levée des Acacias, près de Blois, qui aurait été détruite brutalement suite à la rupture d'un batardeau mis en place quelques dizaines de mètres en amont.

Cependant, on peut penser que le risque d'instabilité d'ensemble existe, en particulier lorsque trois facteurs sont réunis :

- profil de digue étroit avec pentes de talus fortes (fruits supérieurs ou égaux à 1,5H/1V) ;
- piézométrie élevée dans la digue liée à l'absence de drainage et à la présence de couches hétérogènes ;
- faible compacité, donc faibles caractéristiques mécaniques des matériaux du remblai, ou présence d'une couche argileuse sous-consolidée au niveau de la fondation.

Ces trois facteurs sont potentiellement réunis dans les zones d'anciennes brèches dont il est avéré que la réparation n'a pas été menée dans les meilleures conditions.

Enfin, un autre type d'instabilité est envisageable : il s'agit de la rupture du talus côté fleuve lors d'une décrue rapide. Ce phénomène, lié aux sous-pressions qui se développent pendant la période des hautes eaux, concerne surtout des perrés trop étanches⁷ ou des talus de levées constitués de matériaux argileux et dont les pentes sont raides.

3.3 CONCLUSIONS OPÉRATIONNELLES POUR UN DIAGNOSTIC ADAPTÉ

Les mécanismes à l'origine de la formation des brèches ont été bien identifiés et l'analyse des désordres survenus lors des trois crues du siècle dernier fournit un riche retour d'expérience.

a) Le premier mécanisme est la surverse. Bien sûr, le risque dépend essentiellement de l'importance de la crue et de ce point de vue, il est fort possible que des débits similaires à ceux des crues du siècle dernier conduisent à des lignes d'eau sensiblement différentes du fait de l'approfondissement du lit de la Loire sur de nombreux secteurs. A contrario, les nombreuses brèches occasionnées par les trois grandes crues passées avaient favorisé l'expansion de la crue et donc l'abaissement de la ligne d'eau. Les études hydrauliques récentes (HYDRATEC) sont donc de la première importance et le complément indispensable pour évaluer le risque de surverse est un levé topographique précis du profil en long des digues.

b) A ce premier mécanisme, il faut relier les ruptures en retour des vals vers le fleuve. A ce titre, il paraît à tout le moins indispensable que tous les vals « inondables » (ceux alimentés par un déversoir) soient équipés à leur extrémité aval d'un exutoire permettant de restituer au fleuve, en toute sécurité pour la levée, les débits temporairement détournés.

c) Le second mécanisme est lié à l'instabilité des banquettes. C'est un point majeur de fragilité dans tous les secteurs où ces banquettes n'ont pas été refaites ou confortées.

L'inspection visuelle sera l'élément majeur, et le plus souvent unique, pour apprécier l'état de la banquette et sa fiabilité, sachant que le point le plus délicat concerne la fondation des murettes en maçonnerie.

Pour ce dernier point, on peut penser à des reconnaissances géotechniques à faible profondeur au pénétromètre ou au pressiomètre.

d) Le troisième mécanisme concerne les érosions et affouillements en pied de talus au fleuve des levées en bordure du lit mineur. Ce risque s'est très probablement accru depuis le siècle dernier du fait de l'approfondissement du lit mineur et du vieillissement des protections de talus (perrés et leur fondation sur pieux⁸) : cf. photos 7 et 8.

⁷ De ce point de vue, les perrés n'ont pas à assurer la fonction d'étanchéité de la levée et les joints de maçonnerie ne doivent donc pas être continus.

⁸ Les pieux en bois ont en général une très bonne longévité lorsqu'ils sont continuellement immergés. En zone de marnage, le vieillissement est considérablement accéléré.

Une observation visuelle attentive, y compris le cas échéant subaquatique et une analyse morphologique et hydraulique constitueront les éléments de l'étude diagnostic vis-à-vis de ce risque.

e) *Le renard hydraulique* a représenté une part relativement modeste des causes de brèches au XIX^e siècle. Ce risque n'est pas pour autant à sous-évaluer, car il est accru en fonction de la durée de la crue et du vieillissement des levées (tassements différentiels, ruptures d'ouvrages transversaux, terriers d'animaux, racines d'arbres morts).

C'est d'abord l'observation visuelle très détaillée ainsi que le recueil de témoignages de riverains qui seront les principaux éléments du diagnostic. L'observation en crue en sera le précieux complément, le jour où l'occasion s'en présentera.

Les reconnaissances géotechniques visant à identifier les hétérogénéités de matériaux et de perméabilité dans la digue et en proche fondation permettront d'évaluer le risque de renard interne en s'appuyant le cas échéant sur une modélisation hydraulique de la levée.

f) *Le risque d'instabilité d'ensemble*, bien qu'étant, semble-t-il, un facteur marginal des brèches sur les levées de la Loire (mais près de 10 % des brèches du siècle dernier ont des origines indéterminées), ne doit pas être négligé, en particulier pour les levées présentant une faible largeur en crête et de fortes pentes, ainsi que dans l'emprise des anciennes brèches.

L'hétérogénéité avérée des levées rend difficile un diagnostic précis de la stabilité. Il semble plus raisonnable de se livrer à des études paramétriques, basées sur des reconnaissances qualitatives des matériaux et sur les données issues des reconnaissances récentes menées dans plusieurs secteurs, afin d'obtenir des fourchettes de coefficients de sécurité et surtout d'étudier l'amélioration de la stabilité apportée par telle ou telle solution de confortement.

L'étude détaillée des archives doit permettre de localiser la plupart des anciennes brèches, en particulier celles du siècle dernier. C'est sur ces zones que l'on concentrera les investigations géotechniques.

g) Enfin, les solutions envisagées pour le confortement peuvent aussi influencer sur la consistance des reconnaissances géotechniques. On peut citer quelques exemples :

- un confortement par recharge aval drainante nécessite une connaissance de la granulométrie des matériaux du talus et de la fondation de la recharge afin de vérifier les règles de filtre ;
- un confortement par recharge amont étanche nécessite de même une connaissance de la granulométrie des matériaux du talus afin de vérifier les règles de filtre, mais demande aussi une connaissance de caractéristiques mécaniques de la recharge afin de vérifier la stabilité à la décrue ;
- un confortement par paroi moulée exige une bonne connaissance des matériaux de fondation (perméabilité en particulier) afin de caler correctement le niveau d'ancrage de la paroi.

Chapitre 4

Proposition de méthode de diagnostic

4.1 APPROCHE HISTORIQUE

L'approche historique fait partie intégrante de la méthodologie de diagnostic des levées. En effet, la localisation des brèches, loin d'être aléatoire, est largement déterminée par la géométrie du lit endigué et l'exposition de la levée aux assauts de la rivière en crue. On a constaté des facteurs particuliers de risque :

- l'étroitesse du lit entre les endiguements ;
- l'orientation de la levée par rapport à l'écoulement.

La recherche sur les causes de rupture des levées lors des grandes crues historiques montre que les brèches ont tendance à se produire à l'endroit ou à proximité d'anciennes brèches (26% des 257 brèches recensées sont des brèches répétées). Il est noté que les brèches répétées se localisaient de façon préférentielle sur les sites de rétrécissement du lit endigué.

Cette inégale répartition s'explique par le fait que, dans certains tronçons, la levée tente de s'opposer à une évolution morphodynamique puissante d'où il résulte une faiblesse chronique.

On peut également imputer un affaiblissement à des réparations généralement effectuées dans l'urgence.

On mesure ainsi tout l'apport que représente l'analyse historique dans le diagnostic. Il convient dans ces conditions :

- de prendre connaissance des documents disponibles : archives, plans, photos aériennes, études antérieures, travaux de confortement ;
- de localiser les brèches historiques : ce point nous paraît être de toute première importance : la synthèse réalisée dans le cadre du DEA cité précédemment est une première source d'information. La recherche aux archives départementales peut être nécessaire pour remonter aux sources authentiques ;
- de recenser et de localiser les repères de crues historiques ;
- d'effectuer un recensement et une synthèse sur les extractions de matériaux dans la zone.

4.2 APPROCHE MORPHODYNAMIQUE

L'objectif de l'approche morphodynamique est d'identifier les zones à risque historique et les évolutions actuelles défavorables.

Le travail réalisé par M. Halbecq qui renseigne sur la localisation des ruptures est à considérer pour centrer l'analyse morphodynamique sur les points essentiels. En ce qui concerne les cas les plus courants liés au rétrécissement local du lit, le processus en jeu est davantage hydraulique (surverse au niveau du verrou) que morphodynamique. L'approche morphodynamique permettra cependant d'appréhender d'autres causes de rupture mentionnées :

- les ruptures se localisant au niveau des modifications de pente du chenal ;
- des ruptures plus fréquentes lorsque la levée est immédiatement au contact du chenal principal ;
- des points faibles aux extrados de méandres ;
- des brèches situées dans des portions de cours d'eau à chenaux multiples avec présence d'îles végétalisées.

De manière générale, le diagnostic devra permettre d'identifier les évolutions passées et à venir du chenal : glissement des méandres, progression latérale des îlots, enfoncement du lit, points durs et ruptures de pente.

L'échelle spatiale pertinente d'analyse est ici le secteur fluvial de plusieurs kilomètres encadrant la levée étudiée, incluant le lit endigué et les vals de part et d'autre des levées. La connaissance des anciens bras ou chenaux d'expansion des crues renseigne sur les secteurs les plus sollicités.

Signalons qu'un cours d'eau à sable tel que la Loire présente un mécanisme de déformation du lit menant à une grande constance (longueur d'onde des méandres, nombre de bras, îlots...) pour autant que les apports solides ne soient pas entravés à l'amont. Toutefois, des possibilités de modifications importantes existent lors d'événements hydrologiques rares, avec l'apparition d'une mise en suspension intense des matériaux. On constate une déformation régulière du profil en long avec la présence d'ondulations de fond ainsi que du tracé avec l'existence de méandres et îles, ces données pouvant être modifiées lors des très fortes crues par mise en suspension d'une forte quantité de matériaux. La présence des levées accentue sans doute le mécanisme.

L'analyse théorique de la morphodynamique de la rivière repose sur les connaissances de l'hydrologie, de la sédimentologie et des caractéristiques morphométriques du fleuve. Un découpage est réalisé à partir de la connaissance des pentes longitudinales, du tracé, des actions anthropiques (en particulier, les extractions entre levées ou derrière les levées) ; les caractéristiques géologiques sont supposées invariables compte tenu de l'échelle spatiale ; les singularités géologiques seront éventuellement recherchées.

L'étude comparative des profils en long et en travers du cours d'eau est réalisée à différentes échelles de temps sur les documents existants. Les modifications du tracé seront évaluées en termes de coefficient de sinuosité des méandres et de rayon de courbure et en termes de densité de réseau hydrographique. On notera l'évolution dans le temps de l'importance et de la végétalisation des îles. Rappelons que la présence d'une île implique un rétrécissement local, une divergence des lignes de courant avec report d'une partie de l'énergie vers les berges, et un mouvement hélicoïdal des masses d'eau augmentant de manière sensible les forces tractrices sur les berges.

Les constantes seront également mises en évidence (longueur d'onde de méandre ou/et nombre de bras en particulier). L'analyse hydrologique et les profils types de cours d'eau permettront d'estimer des vitesses de courant par zone et les forces tractrices sur le fond et les berges (débit plein bord du lit mineur).

Les sources anciennes qui permettent de réaliser ce travail sont les suivantes :

- cartographie au 1/20 000 du Val de Loire dressée d'après l'arpentage effectué en 1848 ;
- les profils en long de la Loire de Briare à Nantes tracés après la crue de 1856 et sur lesquels sont portés :
 - ♦ les profils en long des levées, tracés après la crue de 1846 et donnant une indication des hauteurs des levées et des banquettes mises en place après 1846 ;
 - ♦ les lignes d'eau de 1856 et 1866 ;
 - ♦ les lignes d'eau des étiages de 1858 et 1859.

Dans les données plus récentes, on peut citer :

- les cartes IGN anciennes ;
- les cartes IGN au 1/25 000 actuelles ;

- profils en long et profils en travers anciens dont le profil en long de l'étude SOGREA (topographie 1965 à 1980) ;
- bathymétrie à diverses dates ;
- profil en long et profils en travers de 1996 ;
- photos aériennes à différentes époques.

L'analyse de terrain permet d'affiner et nuancer les résultats de l'analyse théorique. La reconnaissance du réseau sera effectuée par tronçon préalablement défini. Cette visite permet d'appréhender la composante sédimentologique et renseigne sur les processus d'évolution. On définit les types d'érosions (par pans, par effritement, par encoches) et de dépôts (convexités, élargissements-pertes de charges, raisons exogènes, embâcles). On repérera les profils apparemment stables ou instables et analysera les évolutions possibles : avancée de train de méandres (érosion vive à l'extrados, banc de convexité en cours de végétalisation), enfoncement du lit (ripisylve perchée, traces évidentes aux ouvrages, ruptures de pente). L'évolution longitudinale de la granulométrie est en rapport avec les pentes et tracés ; il est intéressant de prévoir quelques prélèvements de matériaux pour analyse afin de préciser la dynamique en mettant particulièrement en évidence le phénomène de tri granulométrique.

En ce qui concerne les lieux de rétrécissement brusque engendré par la levée, on peut s'attendre à un enfoncement à l'entrée du rétrécissement qui pourra avoir des conséquences sur la stabilité de la digue. Cette aptitude à l'affouillement pourrait être précisée par un suivi bathymétrique régulier.

4.3 TOPOGRAPHIE

4.3.1 OBJECTIF

L'objectif des reconnaissances topographiques à exécuter est triple :

- établir le lien avec les lignes d'eau en crue ;
- préciser les profils en travers pour les études géotechniques ;
- fournir un instrument de report et de suivi des digues.

Les paragraphes suivants précisent ces objectifs et les moyens à mettre en œuvre pour les atteindre. On se reportera à la fiche « Méthode - Topographie » pour plus de précision sur les techniques à mettre en œuvre.

4.3.2 PROFIL EN LONG DES LEVÉES PAR RAPPORT AUX PLUS HAUTES EAUX EN CRUES

L'analyse historique montre que les deux tiers des brèches du siècle dernier (en incluant les brèches de retour à la rivière) sont dues à un surversement.

Les modélisations hydrauliques de la Loire moyenne en cours d'élaboration visent à fournir, dans différents scénarios d'aménagement, les lignes d'eau de référence par rapport auxquelles il convient d'assurer une revanche suffisante.

Il est recommandé d'établir deux profils en long de la crête de digue au pas de 20 à 25 m, le premier sur le sommet de la banquette et le second sur la plate-forme de couronnement, afin de déterminer la revanche disponible et de mettre en évidence les tronçons où cette revanche est insuffisante.

Le rapprochement entre les hauteurs d'eau de référence et la géométrie de la levée nécessite que les profils des levés puissent être rattachés avec précision à un PK hydraulique pour lequel il convient de retenir de préférence le PK de la codification hydrographique Loire-Bretagne.

4.3.3 PROFILS EN TRAVERS

En crue, la digue a pour fonction de maintenir la différence de niveau hydraulique entre le lit endigué et le val. L'ordre de grandeur de la charge hydraulique sur la digue est de 5 ou 6 m pour les crues exceptionnelles.

Les mécanismes de rupture à redouter sont alors le renard (érosion régressive de la digue ou de sa fondation) et l'instabilité du talus côté val pendant la crue et côté Loire pendant la décrue.

Dans les deux cas, l'analyse de ce risque nécessite une bonne connaissance des profils en travers de la levée.

Ces profils en travers fournissent également la donnée de base pour l'étude du confortement si celui-ci est nécessaire.

Il est recommandé de lever des profils en travers espacés de 100 à 200 m en zone homogène et de 50 à 100 m dans les zones complexes, incluant une bande coté fleuve et coté val de largeur suffisante (une dizaine de mètres de part et d'autre) ; chaque profil comportera au minimum 12 points. Selon la configuration (présence d'ouvrages singuliers en particulier), des points supplémentaires peuvent être nécessaires.

4.3.4 PLAN TOPOGRAPHIQUE

L'établissement d'un plan topographique au 1/500 ou 1/1000 s'avère particulièrement utile pour le suivi et la maintenance des levées. Le plan constitue alors le support des observations visuelles, qui est l'outil le plus efficace de suivi des ouvrages. Le coût d'un tel levé, tel qu'il ressort de l'expérience récente dans le département du Maine et Loire s'établit dans une fourchette de 10 000 à 12 000 F HT par kilomètre dès lors que la commande porte sur des tronçons de plusieurs kilomètres.

4.4 ÉTUDE HYDRAULIQUE

4.4.1 CAS DE LA LOIRE PROPREMENT DITE

Le déversement apparaît clairement comme la première cause de rupture des levées. Elle résulte généralement d'une surélévation locale de la ligne d'eau liée à un obstacle ou une singularité hydraulique : rétrécissement brusque à l'approche d'un ouvrage, zone de forte courbure...

Les statistiques de rupture montrent que la partie amont des levées est plus exposée que la zone aval, probablement du fait de ces singularités hydrauliques. La partie amont du val est généralement une zone de rétrécissement brusque du lit.

Comme il a été rappelé au §1.4.1, l'Agence de l'Eau a réalisé une étude hydraulique générale de la Loire Moyenne, qui est la référence hydraulique à retenir pour les études de diagnostic des levées.

Pour le diagnostic d'une levée particulière, il est recommandé d'établir une synthèse des résultats de l'étude hydraulique de référence. Il convient à ce stade d'adapter les résultats de l'étude hydraulique générale et de caler les niveaux de crues de référence par rapport à la levée.

Les aspects hydrauliques particuliers, liés à la morphologie locale du lit (variation rapide de la section hydraulique, courbure du lit, orientation biaisée de la levée par rapport à la direction du courant...) demandent à être abordés par une étude particulière. Dans les cas délicats, il est tout à fait envisageable de réaliser un modèle hydraulique local sur le tronçon de rivière encadrant le secteur de levée à diagnostiquer. Le modèle général fournira les conditions aux limites du modèle local à réaliser.

Suivant la nature du problème posé, le modèle local pourra être un simple modèle filaire en régime permanent dans le but de préciser le forme de la ligne d'eau au voisinage de la levée.

Dans les cas plus complexes, un modèle bidimensionnel type Saint-Venant pourra être indispensable pour analyser les conditions hydrauliques à proximité des digues : surélévation locale de la ligne d'eau, orientation du courant, vitesse de courant.

A noter que la réalisation d'un tel modèle demandera généralement d'affiner localement les données bathymétriques disponibles.

Le choix de la crue de référence sera effectué en relation avec les conclusions de l'étude hydraulique d'ensemble et en tenant compte de la vulnérabilité du val protégé.

Deux débits de crue devront être considérés :

- celui correspondant au premier déversement par le déversoir dans le val protégé ;
- celui correspondant au niveau maximal atteint pendant la crue de référence.

L'aléa de rupture par submersion résultera de la comparaison entre les lignes d'eaux maximales et le profil en long précis de la crête de digue.

4.4.2 CAS DES AFFLUENTS

Contrairement à la Loire proprement dit où une étude hydraulique de référence existe, les grands affluents rive gauche (Cher, Indre et Vienne) n'ont pas fait l'objet d'une étude équivalente.

Le diagnostic des levées comprendra donc une réflexion sur les niveaux de référence à considérer.

4.5 INSPECTION VISUELLE

4.5.1 JUSTIFICATION ET PRINCIPE DE LA MÉTHODE

Bon nombre de désordres pouvant affecter une digue et ses ouvrages annexes se révèlent par des indices de surface : mouvements ou accidents de terrain (au sens le plus large), érosions et ravinements, zones de végétation singulière, terriers de fouisseurs, sorties de canalisation, etc. L'inspection visuelle constitue le meilleur moyen de repérer de tels indices et s'avère incontournable pour établir un état initial de la levée puis en permettre le suivi ultérieur.

Le principe général de la méthode consiste à parcourir intégralement à *pied* le linéaire de la digue à diagnostiquer, en répertoriant toutes les informations visuelles, d'une part sur les caractéristiques morphologiques externes de l'ouvrage (du moins sur celles non répertoriées par ailleurs) et, d'autre part, sur les désordres ou les présomptions de désordre affectant l'une ou l'autre de ses composantes.

Pour les levées bordées par le fleuve et si nécessaire, la reconnaissance doit être complétée côté fleuve par :

- une inspection par barque (cas d'un pied de talus subvertical, inaccessible et/ou boisé) ;
- une visite subaquatique (cas d'un perré ou d'une protection de pied se prolongeant sous le niveau d'étiage).

4.5.2 CONDITIONS ET MOYENS DE MISE EN ŒUVRE

En préalable à la visite de reconnaissance, il est indispensable de collecter et d'analyser l'ensemble des documents disponibles se rapportant à la digue : plans topographiques actuels et anciens, rapports d'études, compte rendus de travaux, documents historiques (plaintes de riverains, constats de dégâts, description de brèches, etc.). A cette occasion, un entretien préliminaire avec le gestionnaire ou le surveillant de la digue s'impose. Après la visite, il convient, si nécessaire, de procéder à un nouvel entretien pour discuter des points particuliers apparus à l'inspection visuelle.

Dans la méthodologie standard de diagnostic à sec que nous proposons, nous recommandons avec insistance que le levé topographique détaillé soit réalisé *avant* l'inspection, dans la mesure où le plan au 1/500 constitue un précieux, pour ne pas dire indispensable, outil de repérage et de report des informations visuelles.

L'analyse documentaire, l'entretien préalable avec le gestionnaire, voire une première reconnaissance rapide, permettent d'établir, avec à propos, les modalités pratiques de conduite de l'inspection : référence kilométrique, repérage sur le terrain, longueur des sections élémentaires de description, etc.

L'inspection proprement dite doit se dérouler après un dégagement soigné de la végétation herbacée et arbustive et, si possible, hors période de végétation (automne et hiver) afin de bénéficier de conditions de visibilité optimales.

L'équipe de terrain est formée de deux ou trois agents compétents en génie civil / mécanique des sols : l'intervention en binôme minimum doit être exigée pour garantir l'exhaustivité et la pertinence de l'inventaire, pour la réalisation, dans de bonnes conditions, des levés complémentaires rapides de caractéristiques géométriques (ex : profils en travers) et, enfin, pour la sécurité des opérations. Si l'inspection est confiée à un prestataire de services, il est souhaitable que le garde-digue ou le surveillant de travaux y soit convié.

4.5.3 LES POINTS À OBSERVER ET INFORMATIONS À RÉPERTORIER

Les opérateurs sont supposés être en possession d'un tirage d'un plan au 1/500 de l'ouvrage, du cahier des profils en travers et d'un jeu de fiches de relevé des désordres, fournis par le maître d'ouvrage.

a) *Caractéristiques morphologiques*

Le travail se limite à vérifier et compléter les principales informations topographiques disponibles : ce qui nécessite de se repérer sur le plan existant au fur et à mesure de la progression.

Des profils en travers sont levés aux sections où il apparaît des singularités non visibles ou mal répertoriées sur le plan (ex : maison ou construction édifiée à proximité de, sur ou dans la levée). On pense également à indiquer les niveaux d'eau constatés le jour de la visite (cotes du fleuve et des plans d'eau).

b) Indices de désordre

Il est recommandé de conduire l'inspection des désordres par parcours méthodique de sections en travers successives de la digue.

Les points à observer sont les suivants :

- talus côté val :

- ♦ végétation (nature et développement, racines et souches) ;
- ♦ amorces de glissement, ravinements ;
- ♦ terriers (taille et densité) ;
- ♦ débouchés de canalisation 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 et développement, racines et souches) ;
- ♦ nature et caractère praticable de la voie de crête (route, chemin) ;
- ♦ fissures longitudinales, fissures transversales ;
- ♦ tassements, fontis ;
- ♦ terriers (taille et densité) ;
- ♦ existence, nature et état du dispositif de rehausse (vérifier, en particulier, l'état du contact avec le corps de digue) ;
- ♦ existence, nature et état du revêtement (déversoir) ;
- ♦ ouvrages singuliers ;

- talus côté fleuve :

- ♦ végétation (nature et développement, racines et souches) ;
- ♦ amorces de glissement ou d'érosion, ravinements, fontis ;
- ♦ terriers (taille et densité) ;
- ♦ débouchés de canalisation et ouvrages singuliers ;
- ♦ zones humides, points d'eau et laisses de crue ;
- ♦ existence, nature et état du revêtement de protection (perré, masque béton,...) ;
- ♦ existence, nature et état de la protection de pied de talus (rideau de pieux ou de palplanches,...) ;
- ♦ singularités topographiques au delà du pied de talus (érosions de berge, dépôts alluvionnaires, fontis).

Parmi les ouvrages singuliers, une attention particulière mérite d'être portée aux maisons ou constructions situées à proximité de, ou incorporées dans, le corps de digue (cf. photos 13 et 14). Le cas est fréquent dans certains secteurs et il ne faudra pas hésiter à inspecter et à décrire de tels points - qui constituent souvent des zones de faiblesse potentielle de la digue - voire à les cartographier avec précision (repérage en plan et en profil), si le plan topographique disponible ne les a pas - ou incomplètement - pris en compte.

Si la digue est équipée de dispositifs d'auscultation à lecture simple, piézomètres notamment, il convient de procéder au relevé des mesures (éventuellement en deux temps si un entretien ou une remise à niveau préalable s'avère nécessaire).

Enfin, les riverains, rencontrés au hasard de la visite, sont interrogés sur le fonctionnement de la digue et les éventuels récents travaux d'entretien réalisés. La teneur des témoignages ainsi recueillis est reportée dans les zones de commentaires des fiches de désordres.

4.5.4 MODALITÉS DE REPORT ET DE RESTITUTION DES INFORMATIONS

Les opérateurs de l'inspection, qu'ils relèvent ou non du maître d'ouvrage de l'étude, utilisent des fiches standard de relevé des désordres, mises à leur disposition par le maître d'ouvrage. L'idée est que le même modèle de fiche soit utilisé sur l'ensemble des levées de Loire moyenne.

Les désordres inventoriés sont repérés et numérotés, partie par partie d'ouvrage, directement sur un tirage du plan topographique au 1/500, en respectant une légende normalisée. Les numéros renvoient à des lignes successives des fiches de relevé des désordres où sont portées les annotations de détail et où l'on code les principales informations. Les profils en travers éventuels sont dessinés au verso des fiches et sont repérés suivant le PK de référence qui a été retenu.

Il est, en outre, établi un dossier photographique complet, parfaitement légendé :

- photos de désordre, référencées par le numéro de désordre ;
- photos d'ensemble.

Si le travail d'inspection a été confié à un prestataire extérieur, il est nécessaire que la prestation comprenne la mise au propre des informations et des légendes, ainsi que la saisie informatique des fiches sur un logiciel et un masque de saisie complètement compatibles avec ceux du maître d'ouvrage.

4.5.5 COÛT ET LIMITES DE L'INSPECTION VISUELLE

Le coût moyen de l'inspection visuelle dans les conditions courantes (sans visite subaquatique, notamment) est évalué à 15 000 F HT par kilomètre, mise au propre et saisie informatique comprises, soit un rendement de 300 à 500 ml/jour pour un binôme d'intervenants.

L'inconvénient de l'inspection visuelle est qu'elle ne fournit aucun élément sur les désordres - a priori liés à des caractéristiques du sol en profondeur et/ou au comportement du fleuve en crue au droit de la levée - qui ne produisent pas (ou qui n'ont pas encore produit) d'indices de surface, en particulier pour les cas de digue à sec (ex : zones de plus grande perméabilité dans le corps de digue ou en fondation, renard hydraulique n'ayant pas débouché, sollicitations par les courants de rive ...) ou dont les indices ont été effacés (ex : constructions ou ouvrages enfouis, accident ou mouvement de terrain remodelés, ancienne zone de surverse, etc.). Le risque d'inexhaustivité de la méthode est, à ce titre, d'autant plus fort que la dernière mise en charge (grande crue) est ancienne.

En dépit de cela, l'inspection visuelle initiale constitue l'étape incontournable du diagnostic : elle doit être réalisée avant toute prospection géotechnique dont elle permettra d'éclairer les modalités de mise en œuvre.

4.6 RECONNAISSANCES GÉOTECHNIQUES

4.6.1 LES CONDITIONS POUR LA DÉFINITION D'UN PROGRAMME DE RECONNAISSANCES

Un programme pertinent de reconnaissances géotechniques et géophysiques ne peut être défini - et a fortiori réalisé - qu'après avoir franchi un certain nombre d'étapes dans l'étude de diagnostic, soit au minimum :

- l'approche historique (cf § 4.1) ;
- le levé topographique à échelle détaillée, 1/500 ou 1/1000 ou au moins le levé de profils en long et en travers avec une précision suffisante (cf § 4.3) ;
- si possible, l'inspection visuelle (cf § 4.5).

L'approche historique, englobant l'analyse des études existantes, fournit des informations préalables sur l'environnement géologique ainsi que sur la constitution de la levée et les accidents - sources de discontinuité - qu'elle a connues (brèches et/ou confortements). Le levé topographique est utile au repérage des sondages et des transecs de prospection à réaliser et, associé à l'inspection visuelle, contribue à une première identification des points ou tronçons singuliers.

L'exploitation rationnelle des résultats de ces trois étapes va alors permettre :

- de choisir les moyens de reconnaissance géotechnique a priori les plus adaptés au contexte ;
- de guider l'implantation physique des dites reconnaissances.

On rappelle, à ce titre, que la part d'une campagne géotechnique devient vite lourde dans un budget d'étude, sachant que le prix unitaire de certains sondages ou essais est élevé (ex : forages carottés) ou que des dispositifs de prospection géophysique, de prime abord moins onéreux, peuvent produire des résultats sans intérêt ou inexploitable si l'appareil utilisé ne se révèle pas adapté à l'objectif recherché. Ceci justifie toute l'attention qu'il convient de porter à la préparation du programme de reconnaissances.

En outre, comme rappelé au § 3.3-g, la réflexion sur les moyens de confortements envisageables peut aussi orienter les choix pour la consistance de certaines reconnaissances géotechniques.

4.6.2 PROGRAMME MINIMUM DE RECONNAISSANCES

En synthèse des fiches de méthodes de reconnaissance, nous décrivons ci-après le programme « minimum » qu'il nous paraît opportun de réaliser dans le contexte géotechnique courant des levées de la Loire moyenne, tel que nous avons pu l'apprécier au travers des études existantes et de nos propres visites de terrain. Dans la section suivante (§ 4.6.3), nous évoquerons les moyens optionnels (en continu) à mettre en œuvre dans certaines situations particulières.

Nous distinguons successivement : les moyens de reconnaissance géophysique en continu, les reconnaissances ponctuelles à caractère systématique, les reconnaissances approfondies sur points singuliers.

a) Reconnaissances géophysiques en continu

A priori, deux objectifs peuvent être assignés à la reconnaissance en continu :

- sous contrôle d'un étalonnage préalable du (ou des) dispositif(s) utilisé(s) et d'une analyse croisée avec les résultats des sondages systématiques (cf b.), fournir une vision spatiale de la constitution de la digue et apprécier son degré d'hétérogénéité ;

- mettre en évidence des points ou des tronçons singuliers, susceptibles d'échapper à la campagne de sondages ponctuels systématiques.

Parmi la panoplie d'outils géophysiques disponibles, le choix n'est pas forcément évident. A ce titre, il semble que les études réalisées à ce jour sur les levées de Loire n'aient jamais fourni l'occasion de confronter directement les performances des différentes méthodes sur un site reconnu comme point singulier (ex : traversée d'un canal ou d'une buse, excavation ou construction dans le corps de la levée, ancienne brèche). Il est prévu de combler cette lacune dans le cadre du Projet National de recherche CRITERRE dont un axe porte sur les méthodes de reconnaissance à grand rendement. Démarré fin 1998, ce projet devrait fournir des conclusions opérationnelles en 20001.

Pour guider le choix de la méthode géophysique, nous recommandons, dans l'attente de conclusions plus précises, d'appliquer les deux principes suivants :

- mettre en œuvre en parallèle, dans le sens longitudinal de la digue, deux méthodes au principe complémentaire et/ou ne mesurant pas le même paramètre ;
- privilégier les méthodes qui, en un seul passage (profil en long), ont une profondeur d'investigation a priori suffisante pour recouper la fondation de la digue.

Une association possible en ce sens est celle qui réunirait :

- une prospection électromagnétique de type EM34, en crête de digue, avec au moins deux mesures par station (coût : de l'ordre de 7 500 F HT du kilomètre) ;
- une prospection au radar géologique avec deux antennes (coût : de l'ordre de 7 500 F HT du kilomètre). La méthode radar paraissant perturbée par la présence d'une chaussée, la prospection pourra être conduite, si possible, sur une ligne parallèle à la route de crête, en sommet du talus côté val. A noter également que le radar n'est pas efficace en profondeur dans les sols fins.

La RTM (radio magnétotellurique) peut être proposée en variante lorsque la digue est circulaire en crête. Cette méthode paraît en particulier adaptée à la détection d'anomalies ponctuelles.

Sur de telles bases, la prospection géophysique en continu exige un budget total de l'ordre de 15 000 F HT du kilomètre, chiffre qui nous semble devoir constituer un maximum compte tenu du volume et de la qualité des informations attendues en retour.

Il va sans dire que d'autres associations de dispositifs peuvent être imaginées en fonction des situations rencontrées. On se reportera à cette fin au tableau de synthèse des méthodes géophysiques proposées.

b) Reconnaissances ponctuelles à caractère systématique

Ces reconnaissances à caractère systématique - en ce sens qu'elles sont répétées le long de la levée à diagnostiquer - ont pour objet de caractériser certes ponctuellement, mais de façon précise, la constitution et une (ou plusieurs) propriété(s) importante(s) de la digue. En outre, les informations recueillies contribueront à l'indispensable calage des méthodes géophysiques (EM34 et radar, en solution de base) mises en œuvre précédemment en continu. Les reconnaissances ponctuelles comprennent, essentiellement, des sondages et des essais géotechniques.

L'établissement du programme de sondages et d'essais résulte d'un compromis entre la performance des dispositifs envisagés, la teneur des informations recherchées (dans notre contexte, pour l'essentiel : défauts de perméabilité et/ou de compacité, contacts entre différentes parties d'ouvrage) et les coûts de mise en œuvre ramenés au linéaire de digue.

Le choix des modalités d'espacement entre sondages est aussi le résultat d'un compromis :

- d'une part, disposer de points de calage pas trop éloignés les uns des autres et à fréquence à peu près régulière ;
- d'autre part, réaliser des sondages dans des zones représentatives d'états-type successifs de la digue.

Aussi, les espacements de sondages que nous suggérons ci-après (200 m et 2 km) doivent être interprétés comme des moyennes, et non de façon absolue. Rien n'interdit, en effet, de faire varier localement les espacements afin de positionner tel ou tel profil de sondages bien à l'intérieur d'un secteur apparaissant comme pertinent suite aux prospections géophysiques en continu ou à l'inspection visuelle.

Le programme-type de sondages systématiques que nous recommandons est le suivant :

■ tous les 200 mètres : en crête de digue, sondage pénétrométrique (statique, dynamique classique ou dynamique léger), jusqu'à atteindre la fondation (8 à 12 m), (*coût : 2 500 F HT par sondage, soit 12 500 F HT du kilomètre*) ;

NB : cette valeur de 200 mètres est choisie comme du même ordre que la longueur moyenne des brèches du siècle dernier (190 m : cf 3.1.2). Ainsi, on peut espérer que la plupart des brèches historiques seront interceptées par au moins un sondage.

■ tous les 2 kilomètres :

- *en crête de digue, côté val* : un sondage carotté poursuivi en fondation (12 à 15 m) et équipé d'un piézomètre (*coût : 15 000 F HT/sondage*), avec :

♦ 2 prélèvements d'échantillons intacts (et essais labo : indentation et mécaniques) ou 3 essais au picomètre, dont un en fondation (*coût : 7 000 F HT*) ;

♦ 2 essais de perméabilité Lefranc, dont un en fondation (*coût : 3 000 F HT*) ;

- *en bas de talus, côté val* : un sondage destructif avec enregistrement des paramètres, poursuivi en fondation (5 à 10 m) et équipé d'un piézomètre (*coût : 5 000 F HT/sondage*) ;

- *en section transversale* : une prospection EM34 et un profil radar, se prolongeant au delà des pieds de talus (*coût : 3 000 F HT*).

(coût total : 33 000 F HT par profil, soit 16 500 F HT du kilomètre)

Le prix de revient global des reconnaissances systématiques ainsi définies est de l'ordre de 29 000 F HT du kilomètre.

En variante à cette solution de base, et lorsqu'on s'intéresse essentiellement, voire exclusivement (cas d'une levée ayant déjà fait l'objet de sondages ou essais mécaniques et/ou apparaissant comme largement dimensionnée au plan mécanique) aux caractéristiques de perméabilité de la digue, les reconnaissances systématiques pourront être basées sur l'utilisation du Perméafor. Vu la facilité d'accès, les rendements escomptés devraient être de l'ordre de 50 m/jour, soit 4 forages de 12,5 m. A raison d'un essai tous les 200 mètres, on aboutit à un coût d'environ 20 000 F/km - montant inférieur à celui de la solution de base mais pour un recueil d'informations plus restreint.

c) Reconnaissances approfondies sur points ou tronçons singuliers

Elles sont à réaliser aux points ou tronçons de levée où les investigations en continu ou à caractère systématique, ou encore l'inspection visuelle, ont mis en évidence des anomalies ou des singularités, susceptibles de révéler l'existence d'une zone de faiblesse dans la digue.

Par essence, il est impossible d'établir un programme-type pour ces reconnaissances qui devront s'adapter, au cas par cas, à la situation rencontrée.

Tout au plus, pouvons-nous fournir quelques pistes :

- une prospection radar approfondie permettra de repérer le contour ou le tracé de singularités à interface très tranchée comme celle d'un ouvrage dur enfoui dans le sol (ex : ancienne canalisation, maçonnerie) ou d'un gros vide ;
- les méthodes électriques, du type panneau électrique, seront plus adaptées pour la cartographie de zones singulières de sol à faible résistivité (ex : poche d'argile, horizon humide).

Pour le reste, il sera fait application du tableau de synthèse des fiches des méthodes géophysiques.

La rémunération de telles prestations particulières ne peut se faire que sur bordereau des prix unitaires, avec quantités indicatives portées dans un détail estimatif : ceci nécessite de prévoir au marché un bordereau de prix couvrant une large gamme de prestations.

4.6.3 RECONNAISSANCES EN CONTINU À CARACTÈRE OPTIONNEL

Elles ne sont à envisager que dans des contextes géologiques particuliers. Par exemple, dans les zones à phénomènes karstiques potentiels (ex : levée du Val de Bou), la réalisation de profils sismiques en continu, au pied des talus, permettra de suivre le profil en long de la fondation et de repérer des thalwegs aveugles, sièges éventuels de circulation karstique.

Pour le reste, comme précédemment, il sera fait application du tableau de synthèse des fiches des méthodes géophysiques.

4.6.4 COÛT RÉCAPITULATIF

Si on exclut les reconnaissances en continu optionnelles (cf § 4.6.3) et les reconnaissances particulières sur tronçons singuliers, le coût récapitulatif de la méthode de prospection géophysique et géotechnique préconisée s'établit aux environs de 40 000 à 50 000 F HT du kilomètre. Dans le budget global, ce poste demeure donc d'un poids important : ce qui confirme l'intérêt qu'il y a à préparer de façon minutieuse et réfléchie le programme d'intervention.

4.7 MODÉLISATION

4.7.1 CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

La modélisation numérique est désormais une approche très courante en géotechnique. L'accroissement de la puissance de calcul des micro-ordinateurs et le développement de logiciels spécialisés de plus en plus conviviaux permettent de tester rapidement une gamme de cas de charge sur un ouvrage, sous un large faisceau d'hypothèses.

L'intérêt évident de ces outils ne doit cependant pas faire oublier deux limitations importantes :

- tout modèle est une simplification intellectuelle de la réalité qui repose sur la représentation plus ou moins complète de quelques phénomènes physiques et de leurs interactions (parmi lesquelles les conditions aux limites) ;
- la qualité du résultat d'une modélisation est d'autre part directement dépendante de la qualité et de la représentativité des données servant à fixer les paramètres du modèle.

Sur le premier point, on peut a priori considérer que, s'agissant d'ouvrages relativement simples, l'analyse des digues ne nécessite pas des modèles très sophistiqués et de nombreux outils largement répandus dans l'ingénierie peuvent être considérés comme adaptés. Par contre, la modélisation trouve essentiellement ses limites sur le second point : les levées sont hétérogènes et certains paramètres des modèles sont difficiles à obtenir de façon représentative et fiable (en particulier les caractéristiques mécaniques).

La modélisation des levées nous semble donc devoir être menée dans l'esprit suivant :

- privilégier des modèles relativement simples dont les paramètres et les conditions aux limites puissent être assez faciles à caler ;
- pour le diagnostic des levées, vérifier systématiquement la sensibilité des résultats en faisant varier les données dans des plages issues des résultats des reconnaissances ou issues d'autres études ;
- utiliser les modèles pour comparer entre elles diverses solutions de confortement et/ou optimiser leur dimensionnement.

4.7.2 MODÉLISATION HYDRAULIQUE

Les modèles d'écoulement interne dans les sols sont bien adaptés pour représenter les phénomènes hydrauliques dans les levées lors des crues.

Certains modèles permettent le calcul aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire et prennent en compte la variation de la perméabilité en fonction du degré de saturation. De tels modèles permettent donc de calculer par exemple le volume de fuite total à travers une levée lors d'une crue dont on connaît l'hydrogramme.

Cependant, la sophistication du modèle ne doit pas faire oublier l'imprécision sur les données : géométrie exacte des couches, valeurs de perméabilité à saturation (c'est le paramètre que l'on mesure lors des essais), variation de la perméabilité en fonction du degré de saturation (données issues, en général, de la littérature).

Il semble donc plus raisonnable de se limiter à une modélisation en régime permanent avec des perméabilités constantes pour chacune des couches. On s'attachera par contre à faire plusieurs simulations avec des perméabilités différentes, prises dans la gamme des valeurs issues des essais.

Les résultats attendus de la modélisation hydraulique sont les suivants (dans l'ordre d'importance) :

- détermination de la piézométrie interne de la digue en crue pour injecter les résultats dans la simulation mécanique ;
- détermination des gradients hydrauliques pour identifier les risques de formation de renard ;
- estimation des débits de fuite.

4.7.3 MODÉLISATION GÉOMÉCANIQUE

Le calcul du niveau précis de sécurité des levées vis-à-vis du risque de rupture est délicat, essentiellement du fait de l'hétérogénéité des matériaux et de la difficulté de disposer de caractéristiques mécaniques représentatives, d'autant plus que les essais in situ faits sur des digues « à sec » donnent des résultats qui surévaluent très probablement les caractéristiques des matériaux saturés. On s'attachera donc essentiellement à mener une étude paramétrique sur ces caractéristiques en prenant en compte la piézométrie issue de la modélisation hydraulique ou d'hypothèses simplificatrices.

Les modèles simples basés sur les mécanismes de rupture plane (en particulier circulaire) sont bien adaptés à l'étude des digues sans qu'il soit nécessaire de mettre en œuvre des modèles plus sophistiqués tels que les éléments finis.

La modélisation mécanique sera surtout intéressante pour évaluer l'amélioration apportée par un confortement, comparer entre elles différentes solutions et optimiser leur dimensionnement. Cela ressort donc plutôt d'une phase d'A.P.S. (Avant-Projet Sommaire), voire d'A.P.D. (Avant-Projet Détaillé).

En résumé, la sophistication des modèles ne doit pas cacher les incertitudes sur les données (caractéristiques des matériaux et conditions aux limites). Il convient, dans les cahiers des charges des études, d'orienter les prestations plutôt vers des modèles simples avec des paramètres accessibles aux reconnaissances. Une approche paramétrique sera privilégiée. Les hypothèses de calcul devront être très clairement explicitées et validées.

4.8 HIÉRARCHISATION CARTOGRAPHIQUE DES RISQUES LIÉS À LA RUPTURE

Il convient généralement d'intégrer à l'étude de diagnostic de la levée une évaluation sommaire des risques liés à sa rupture ou à son dysfonctionnement.

En effet, les conséquences de la rupture d'une levée ou d'un tronçon de levée doivent être sommairement appréciées, de façon à hiérarchiser les tronçons d'étude et à adapter, le cas échéant, les moyens de diagnostic ou de confortement mis en œuvre à la vulnérabilité du val protégé.

Les *aléas* de rupture seront appréciés en se fondant sur les conclusions de l'expertise, qui visera à affecter à chaque tronçon de levée une classe d'aléa de rupture, suivant la classification suivante :

- 0 - levée parfaitement sûre ;
- 1 - levée moyennement sûre ;
- 2 - levée à risque modéré ;
- 3 - levée à haut risque.

L'aléa global d'un tronçon résulte de l'aléa le plus élevé parmi les aléas partiels liés aux différents mécanismes de rupture ou de dégradation (surverse, érosion côté Loire, érosion interne, fontis,...).

La *vulnérabilité* sera appréciée, à partir des critères suivants :

- occupation des sols (zone urbaine, périurbaine, industrielle, agricole,...) ;
- importance de la population protégée ;
- voies de communication menacées (routes, voies ferrées, canaux,...) ;

et sera caractérisée par une classe de vulnérabilité :

- 1 - vulnérabilité faible ;
- 2 - vulnérabilité moyenne ;
- 3 - vulnérabilité forte ;
- 4 - vulnérabilité très forte.

L'évaluation du *risque* associé à un tronçon est le croisement de l'*aléa de rupture* du tronçon et de la *vulnérabilité* du val protégé. Il est caractérisé par une note qui est le produit des notes d'aléas et de vulnérabilité.

Ce nombre, compris entre 0 (aucun risque) et 12 (risque majeur), permet de comparer en termes de risque des situations diverses. Ainsi le même risque, caractérisé par la note 6, sera associé à une levée présentant un haut aléa de rupture et protégeant un val à vulnérabilité moyenne et une levée à aléa modéré protégeant un val à vulnérabilité forte.

Une approche cartographique, à une échelle adaptée (1/10 000), est recommandée pour la synthèse de l'étude de risque. Elle fera ressortir :

- le découpage en tronçons homogènes ;
- la caractérisation par tronçon de l'aléa de dysfonctionnement et de rupture ;
- la vulnérabilité par zone des vals protégés ;
- la classe de risque associée à chaque tronçon.

4.9 SOLUTIONS DE CONFORTEMENT

4.9.1 PRINCIPALES OPTIONS DE CONFORTEMENT SELON LES SITUATIONS

Il ne relève évidemment pas des dispositions de la présente étude de définir les renforcements à réaliser sur les digues de la Loire moyenne. Cependant, un rapide inventaire des principales options de confortement, de nature à répondre aux diverses situations d'insécurité des levées, permet d'identifier un certain nombre de contraintes à répercuter dans le libellé des prestations que le bureau d'études, chargé du diagnostic, devra assurer au titre de sa mission de conception.

En effet, comme nous l'avons déjà signalé au paragraphe 3.3.g, les solutions envisagées pour le confortement peuvent orienter la consistance d'une partie des reconnaissances géotechniques.

Pour ce faire, nous nous appuyons sur les mécanismes potentiels de dégradation et de rupture tels que répertoriés au paragraphe 3.2 du présent rapport. Ceci nous permet d'établir une grille d'analyse présentée dans le tableau ci-après.

On remarque tout d'abord, à l'examen de ce tableau, que quelques types de confortement peuvent efficacement pallier plusieurs mécanismes distincts de rupture : tel est le cas, par exemple, de la recharge drainante côté val ou encore de la paroi moulée étanche dans le corps de digue.

Par ailleurs, la faisabilité de certains travaux de confortement est soumise à conditions : par exemple, la création d'une recharge côté val nécessite de disposer d'une emprise suffisante en pied de levée (ce qui ne sera pas le cas lorsque des constructions sont implantées dans, ou à proximité immédiate, du talus concerné).

MÉCANISMES DE RUPTURE	OPTIONS DE CONFORTEMENT	COMMENTAIRES : objectifs du confortement, domaine/contraintes d'application
Surverse	Suppression des points bas ou rehaussement de la digue	<i>Adaptation de la cote d'arase de la levée en veillant à l'étanchéité de la rehausse</i>
	Déversoir amont	<i>Limitation de la cote de crue au droit de la levée</i>
Rupture en retour	Protection / revêtement du talus côté val	<i>A réserver a priori aux zones identifiées de fortes sollicitations hydrauliques du talus en retour de crue</i>
	Recharge en pied et/ou adoucissement du talus côté Loire	<i>En cas d'instabilité du talus à la décrue du fleuve, le corps de digue demeurant saturé sous l'effet de la charge côté val</i>
Rupture des banquettes	Déversoir fusible ou vannage de retour	<i>Limitation de la durée d'inondation dans le val</i>
	Renforcement de la banquette : stabilité générale, contact avec la digue	<i>Lorsque la configuration de la banquette ou de la murette le permet dans des conditions de coût raisonnables</i>
Érosion de talus et affouillements	Rehaussement de la digue	<i>Lorsque la solution précédente est irréalisable</i>
	Protection du pied de levée côté Loire	<i>Pour les zones en contact direct avec le fleuve (risque de remise en mouvement du fond d'alluvions)</i>
Renard hydraulique	Protection / revêtement du parement du talus côté Loire	<i>En complément, ou non, d'une protection de pied</i>
	Recharge drainante côté val	<i>Lorsque l'emprise disponible le permet, nécessité de respecter les règles de filtre au contact recharge / talus de la digue</i>
	Masque étanche côté fleuve ou paroi moulée dans le corps de la levée	<i>Limitation des débits de fuite et/ou augmentation de la longueur des lignes de fuite</i>
	Lutte contre les fousseurs	<i>Capture des animaux, protections grillagées, etc.</i>
Instabilité d'ensemble	Traitement des points singuliers	<i>Lorsque ceux-ci sont à l'origine du risque de renard : traversées de conduite, constructions, caves</i>
	Recharge du talus côté val et/ou côté fleuve	<i>Selon le talus concerné (en général, du fait d'une pente trop forte)</i>
	Masque étanche côté fleuve ou paroi moulée dans corps	<i>Pour stabiliser le talus côté val en rabattant la ligne de saturation dans la digue</i>

Pour chaque nature de confortement, il convient également de prendre en compte les inconvénients ou répercussions diverses possibles : une recharge ou une protection côté fleuve réduit la section et/ou modifie les conditions d'écoulement en lit mineur et, en principe, est soumise à autorisation au titre de la loi sur l'Eau ; de même, la création d'un masque ou d'un revêtement d'étanchéité côté fleuve introduit un risque d'instabilité mécanique à la décrue et/ou en conditions de fonctionnement inverse (niveau du fleuve plus bas que celui d'inondation du val) ; etc.

4.9.2 OBJECTIF À ASSIGNER AU TITRE DE LA PHASE DE CONCEPTION DES CONFORTEMENTS

L'objectif général à mentionner pour le volet d'étude «solution de confortement» est d'aboutir à la conception, au minimum au stade A.P.S. (Avant-Projet Sommaire), de l'ensemble des ouvrages nécessaires à la mise en sécurité de la digue face à la situation de crue d'occurrence centennale (niveau de sécurité habituellement pris en compte pour les ouvrages défendant des zones urbanisées). Le fait d'exiger une conception des confortements jusqu'au niveau A.P.S. permet a priori d'assurer que l'étude de diagnostic conduira à des conclusions opérationnelles, immédiatement exploitables par le service gestionnaire en vue de la programmation des travaux (dans le cas contraire, il est à peu près garanti qu'une seconde étude s'avérerait nécessaire avec l'inévitable surcoût en résultant ...).

Un tel objectif impose, par la définition contractuelle même de la mission de conception avec établissement de l'avant-projet sommaire :

- de parfaitement identifier et évaluer tous les mécanismes de dégradation ou de rupture susceptibles d'affecter la digue dans sa configuration actuelle : d'où la nécessité d'un diagnostic approfondi et pertinent (se reporter aux étapes précédentes de la démarche) ;

- d'inventorier, au niveau du principe, et de comparer entre elles, sous couvert d'un prédimensionnement, l'ensemble des solutions de confortement ou d'aménagement possibles pour pallier les déficiences potentielles de la levée ;

- de choisir, justifier suivant le critère technico-économique et chiffrer la (ou les) solution(s) préconisée(s), non sans avoir intégré toutes les contraintes de réalisation que celles-ci émanent de la maîtrise d'ouvrage (ex : restrictions d'emprise, phasage imposé par des contraintes budgétaires, etc.) ou d'éléments techniques relevés au préalable ou en cours d'étude.

En définitive, sous la réserve de l'application de la totalité de la démarche d'étude préconisée dans le présent rapport, l'objectif d'aboutir, au titre du diagnostic approfondi de la levée, à l'établissement de l'avant-projet sommaire des travaux de confortement nous paraît tout à fait réaliste, tout au moins dans la grande majorité des cas (les exceptions pouvant provenir de situations particulièrement complexes tels que, par exemple, les secteurs de levée confrontés à des problèmes de fondation karstique).

4.9.3 ÉLÉMENTS DE JUSTIFICATION ET CONTRAINTES TECHNIQUES À FAIRE PRENDRE EN COMPTE

Plusieurs éléments de justification et contraintes techniques méritent d'être pris en compte au titre de la phase de conception des ouvrages. Nous citons ci-après ceux qui nous paraissent les plus importants et dont nous recommandons la mention systématique dans les cahiers des charges de consultation des bureaux d'études :

a) Dimensionnement des ouvrages

L'utilisation de modèles simples, hydrauliques ou géomécaniques, contribue à l'évaluation de la sécurité de la digue à l'état actuel (cf paragraphe 4.7). Les mêmes outils peuvent, dès lors, être mis en œuvre, pratiquement sans surcoût, pour évaluer l'état conforté : ceci permet efficacement, en dépit de l'imprécision des modèles, de comparer entre elles différentes options de confortement et d'optimiser leur prédimensionnement.

b) Étude de matériaux de remblaiement

La plupart des engraisements ou recharges réalisés sur les digues de la Loire l'ont été avec des matériaux sableux non compactés, sans doute directement issus des alluvions récentes du fleuve. Or, les prélèvements en lit mineur étant maintenant en voie d'interdiction, les sources d'approvisionnement en matériaux utilisables pour la construction de remblais sur les digues sont susceptibles de se diversifier.

Dans ce contexte, il y a lieu de recommander de procéder, dès le stade de conception des ouvrages de confortement, à une première étude géotechnique des matériaux de remblai pouvant être approvisionnés sur un site donné, que ceux-ci proviennent de ballastière en lit majeur ou de carrière. En particulier, selon la fonction recherchée pour le confortement (étanchéité, renforcement mécanique, recharge de pied, etc.), on pourra étudier l'aptitude au compactage des dits matériaux en gardant à l'esprit qu'un remblai compacté présente des propriétés intéressantes : meilleure étanchéité et résistance mécanique améliorée (remblai plus dense, plus résistant au cisaillement mais aussi à l'érosion).

c) Traitement des points singuliers

Dans les secteurs de levée confortés à partir des années 70 par l'aménagement-type de recharge côté val (soit environ 75% du linéaire en Loire moyenne), les points ou ouvrages singuliers (traversées de canalisations ou de galerie, constructions dans le talus côté val, etc.) n'ont, en général, pas été traités.

Il est donc probable que le problème des points singuliers tiendra une place prépondérante dans bon nombre d'études de diagnostic à venir, et ce à double titre :

- au plan du diagnostic sensu stricto, ces points pourraient bien être ceux pour lesquels l'aléa de rupture de la levée demeure le plus fort ;
- au plan du confortement, leur traitement relève en général de travaux spéciaux dont, de plus, il faut assurer le raccordement avec les travaux «standard» réalisés de part et d'autre.

d) Difficultés de réalisation et travaux provisoires

Il est courant, au stade A.P.S., de sous-estimer les difficultés d'exécution. Cela peut être notamment le cas pour les travaux en conditions immergées, comme par exemple ceux de renforcement du pied de levée côté Loire en zone de contact direct avec le fleuve, ou pour des interventions en secteur d'emprise limitée, comme par exemple sur le talus côté val avec des bâtiments à proximité. Il convient également - en particulier lorsqu'il est prévu des terrassements provisoires en déblai dans le corps de digue - de s'assurer que la sécurité de la digue en cours de travaux pourra être maintenue au moins à son niveau initial (avant travaux) ou, à défaut, que l'on disposera sur le chantier des moyens permettant de rétablir ce niveau de sécurité avant l'arrivée éventuelle d'une crue.

Aussi faut-il attirer l'attention du prestataire de services sur de telles contraintes d'exécution et lui demander de tenir compte, dans l'évaluation des travaux de confortement, de tous les ouvrages provisoires et autres dispositions qui pourraient s'avérer nécessaires : batardeaux, soutènements ou remblaiements provisoires, phasage particulier d'exécution, etc.

e) Phasage des travaux

En général, le coût au kilomètre linéaire des confortements s'avère élevé (plus de 5 000 000 F / km). Aussi, pour d'évidentes raisons budgétaires, le linéaire de digue pouvant être conforté annuellement sera limité. Il convient, en conséquence, de demander au bureau d'études l'élaboration d'un plan de phasage des travaux en tranches opérationnelles. Pour ce faire, le prestataire aura à charge de définir un ordre de priorité d'intervention en croisant le degré d'insécurité de la digue (c'est-à-dire l'aléa de rupture) avec la vulnérabilité, c'est-à-dire la valeur des enjeux directement protégés par celle-ci (cf paragraphe 4.8).

f) Contrainte de cohérence du projet de confortement

La cohérence de l'aménagement s'apprécie en observant les ouvrages de confortement projetés, non plus sur des profils en travers successifs, mais sur une vue générale en plan.

La premier point à vérifier est, rappelons-le à toutes fins utiles, la compatibilité de l'aménagement projeté avec la configuration ou d'éventuels aménagements relatifs à la berge opposée : ceci sera, de fait, obligatoire pour les travaux soumis à autorisation au titre de la Loi sur l'Eau.

En second lieu, il convient de s'assurer qu'à l'échelle de l'ensemble du secteur de digue à aménager, l'application de profils-type de confortement en fonction des situations successivement diagnostiquées ne se traduise par un « saucissonnage » excessif de la levée. Autrement dit, pour des raisons de facilité (et donc de coût) d'exécution et mis à part le cas particulier du traitement des points singuliers (se reporter au §c. ci-dessus), il vaut mieux privilégier les solutions quelque peu « polyvalentes » pouvant être appliquées sans interruption sur des linéaires suffisamment longs.

Une autre contrainte à prendre en compte est celle des dispositions techniques à prévoir pour assurer la continuité de la protection dans les zones de raccordement d'un type de confortement à l'autre.

g) Prise en compte des contraintes environnementales

Le fait qu'une levée soit un ouvrage artificiel ne doit pas, bien évidemment, conduire à écarter les solutions de confortement respectueuses de l'environnement. Certes, il existe des interdits qu'il serait dangereux de transgresser comme celui de favoriser ou d'autoriser le développement de végétation arbustive ou arborescente sur les corps ou en pied de levée et/ou à proximité des ouvrages en maçonneries.

A défaut de pouvoir cacher la levée, on peut cependant en soigner l'esthétique en privilégiant le recours aux ouvrages en maçonnerie traditionnelle de pierres ou ceux construits avec des éléments préfabriqués modernes qui permettent la croissance de la végétation herbacée (ex : dalles perforées de protection de berges). La mise en œuvre de techniques de protection végétale est également possible pour les travaux de stabilisation des berges du lit, *sous réserve*, cependant, de ne pas risquer le développement de la végétation ligneuse sur le corps de digue ou à proximité de son pied : cela condamne a priori leur usage dans les zones de contact direct de la levée avec le fleuve. En outre, il convient de vérifier, au cas par cas, l'adéquation de ces techniques végétales vis-à-vis des contraintes hydrauliques subies et de s'assurer qu'un entretien régulier des ouvrages pourra être effectué.

Dans le même esprit de préservation de l'environnement, on peut avantageusement, dès le stade de conception, chercher à minimiser l'emprise des zones à réaménager : à ce titre, la préférence pourra être donnée, si c'est possible, aux solutions de confortement (d'ailleurs a priori plus économiques) qui ne portent que sur un seul des talus plutôt que sur les deux.

Enfin, les travaux devront être pensés dans le souci de limiter au maximum les impacts et nuisances en cours de chantier (mise en place de batardeaux, arrosage des pistes de chantier, etc.) et de prévoir les mesures compensatoires et/ou d'insertion nécessaires.

Chapitre 5

Méthodes de diagnostic lors des crues

5.1 INSPECTION VISUELLE EN CRUE

5.1.1 JUSTIFICATION ET PRINCIPE DE LA MÉTHODE

L'objectif général de l'inspection en crue est de répertorier, repérer et évaluer les désordres ou présumptions de désordre liés plus ou moins directement à l'état «en charge» de la levée, révélant les zones de faiblesse de l'ouvrage (en complément de celles décelées lors des inspections à sec) et/ou susceptibles d'en annoncer la rupture prochaine. Ces désordres peuvent résulter des contraintes hydrauliques ou mécaniques externes subies par la digue (charge hydraulique, surverse, courant de rive, vagues, ressauts et turbulences) ou des mécanismes internes déclenchés par la mise en eau (circulations d'eau à travers ou sous le corps de digue, état de saturation, courants hydrauliques, pressions interstitielles).

Le principe de la méthode consiste à parcourir un linéaire de digue en charge, au cours d'une crue du fleuve. Il se peut donc que cette inspection se déroule en situation de crise (alerte de crue, plan ORSEC) et, par ailleurs, porte sur des secteurs n'ayant pas (encore) fait l'objet d'une reconnaissance visuelle initiale (cf paragraphe 4.5). Par rapport à l'inspection à sec, l'inspection en crue présente l'avantage de pouvoir fournir d'intéressants éléments sur les désordres ou leurs évolutions liés à des caractéristiques du sol en profondeur (ex : zones de plus grande perméabilité dans le corps de digue, indices d'érosion interne, ...) et/ou au comportement du fleuve en crue au droit de la levée (ex : surverse, érosion de berges, ...). Le problème réside dans le fait que le constat de l'un ou l'autre de ces indices peut précéder de très peu une rupture plus ou moins soudaine de l'ouvrage.

Outre la nature des indices de désordre à plus particulièrement observer (cf paragraphe 5.1.3), l'inspection visuelle en crue se distingue des inspections à sec par plusieurs aspects importants :

- elle se pratique sous deux formes, d'ailleurs non exclusives l'une de l'autre :
 - ♦ inspection *linéaire* (et éventuellement renouvelée au cours de la crue) d'un plus ou moins large secteur *prédéfini* à but d'y vérifier le fonctionnement critique de la digue (en situation de crue majeure, avec forte charge sur l'ouvrage et crainte pour sa sécurité) ou, lors de crues modérées ne mettant en charge que partiellement la digue, de parfaire la connaissance de l'ouvrage et de ses défauts d'étanchéité ;
 - ♦ inspection *ponctuelle* (et éventuellement répétée) d'une zone restreinte et circonscrite de levée où ont été signalés par des témoins - ou sur laquelle on redoute a priori (ex : ouvrage singulier) - des désordres (fuites, surverse, ...) et leurs conséquences. Par nature, certaines de ces inspections sont dictées par l'actualité et leur programmation se décide donc à chaud, par l'intermédiaire d'une cellule de crise ;
- le moment (et la saison) de la visite est imposé par les événements et le délai de préparation est plus ou moins court. En conséquence, si les talus de la digue s'avèrent mal entretenus (végétation), on ne disposera guère de temps pour faire effectuer un débroussaillage préalable (d'où l'intérêt d'assurer un entretien régulier des ouvrages afin de maintenir en toutes circonstances des conditions de visibilité optimales) ;
- les observations effectuées au titre de la visite en crue peuvent rentrer dans un processus de gestion de crise et conditionner des procédures d'évacuation de zones de population exposée ou la mise en œuvre de travaux conservatoires avec des moyens manuels ou mécaniques (ex : obstruction de passage busé, confortements divers, colmatage de brèche). Il est donc nécessaire de couvrir un maximum de

linéaire de digue en un minimum de temps, en s'attachant aux points essentiels de la visite, et de disposer, en outre, de moyens de communications rapides ;

- les évolutions à suivre peuvent être rapides et les informations recueillies doivent être rattachées à une échelle de temps fine (de l'ordre de la minute ou à tout le moins du quart d'heure) ;

- les opérateurs de terrain sont potentiellement exposés à des risques corporels et des mesures doivent être prises pour assurer leur sécurité.

Tous ces éléments imposent de définir, hors période de crise, les modalités pratiques de mise en œuvre de l'inspection en crue (plan de vigilance) et, si possible, de les tester par des exercices de simulation.

5.1.2 CONDITIONS ET MOYENS DE MISE EN ŒUVRE

L'inspection en crue peut être effectuée, par principe, dans tous les terrains quelles que soient les difficultés d'accès mais *son efficacité, tout comme son rendement, s'avèrent étroitement dépendants de l'état d'entretien de la végétation de la digue*, au moment (imposé) de l'inspection. Comme ce moment n'est pas connu à l'avance, le seul moyen de garantir de bonnes conditions de visibilité consiste à assurer un entretien soigné et permanent de la digue et de ses abords.

La préparation et l'organisation de l'inspection visuelle en crue de la digue relèvent, en principe, du service gestionnaire des ouvrages. Mais s'agissant d'une opération susceptible de s'inscrire dans un processus de crise, la conduite effective des inspections peut faire intervenir des agents extérieurs à ce service, tant au niveau décisionnel qu'opérationnel, et introduit des problèmes de communication et de coordination.

L'essentiel de la préparation de cette mission doit s'effectuer hors de la période de crise. Il convient d'abord d'identifier les secteurs ou les points de digue qui feront prioritairement l'objet d'inspection(s) en crue et ce, en fonction de la connaissance que le service gestionnaire a de l'état des digues (grâce à la reconnaissance initiale et aux inspections de routine) et des enjeux qu'elles protègent. Pour chacun d'entre eux, sera dressée une check-list sur le déroulement des opérations (repérage PK du secteur ou du point à inspecter, mention et coordonnées PK des points particuliers à contrôler pour une inspection linéaire, aide-mémoire général sur les désordres à observer, fréquence de l'opération si on estime qu'elle doit être renouvelée plusieurs fois en cours de crue).

La check-list mentionnera également les documents et les matériels à emporter par les opérateurs (en s'assurant que le service en dispose d'un nombre d'exemplaires suffisant). Des équipements particuliers de sécurité et de communication sont à prévoir pour ce type d'inspection et notamment : gilets de sauvetage, talkie-walkies, téléphones mobiles, etc.

L'équipe de terrain est formée de deux agents dont un au moins compétent en génie civil / mécanique des sols : l'intervention en binôme s'avère souhaitable, voire indispensable, pour le transport du petit matériel, pour la réalisation, dans de bonnes conditions, des levés rapides et, enfin, pour la sécurité des opérations. La compétence de l'un des agents en mécanique des sols constitue un garant de la pertinence des observations, mais aussi de l'appréciation des risques à court terme pour la sécurité de l'ouvrage et donc des intervenants eux-mêmes (sécurité de l'inspection). Il est, enfin, recommandable que l'un des opérateurs soit également le gestionnaire courant (responsable des inspections de routine et du contrôle des travaux d'entretien) du secteur de digue concerné.

Quoi qu'il en soit, tout ceci relève de dispositions à consigner dans un plan de vigilance devant tenir compte de l'organisation et des moyens courants du service gestionnaire et des moyens supplémentaires mobilisables en situation de crise (et relevant d'autres services).

Le plan de vigilance est élaboré dans un souci de sécurité des intervenants et d'efficacité des communications et prises de décision. Il identifie explicitement les équipes à mettre en œuvre et, pour chaque équipe, le tronçon de digue à surveiller. Ce plan prévoit aussi les modalités d'appui hélicopté pour l'inspection visuelle en crue : évacuation/secours des opérateurs, apports de matériel ou matériau pour travaux conservatoires.

La longueur du tronçon affecté à une équipe dépendra de trois facteurs :

- *niveau de sécurité* du tronçon déterminé par les études de diagnostic réalisées « à sec ». Un tronçon présentant des désordres ou des faiblesses préalablement identifiés devra faire l'objet d'une surveillance plus soutenue ;
- *conditions de l'observation* : moyens de circulation sur la levée, état de la végétation ;
- *degré de vulnérabilité* des zones protégées par les digues.

On peut considérer en première approche que la longueur d'un tronçon affecté à une équipe donnée ne devrait pas dépasser une vingtaine de kilomètres.

5.1.3 LES POINTS À OBSERVER ET INFORMATIONS À RÉPERTORIER

Les sources et points de désordre à contrôler sont les suivants :

. talus côté val :

- amorces ou indices de mouvement de terrain (fissures, bombements, affaissements) sur le talus ou son revêtement éventuel ;
- repérage des gros terriers ;
- indices de surverse (herbe couchée, ravinement) ;
- fuites, suintements, zones humides ou saturées et rigoles sur le rampant du talus ou de son revêtement, aux débouchés des terriers, des canalisations, du drain du confortement aval, des ouvrages singuliers (batardeaux ou non) ;
- résurgences au-delà du pied de talus dans les fossés, canaux, dépressions - turbidité des eaux de tous les écoulements décelés ;
- si un déversement est constaté : longueur, épaisseur et hauteur de la lame d'eau, tenue au ravinement du talus ou du déversoir (y compris les bajoyers), extension de l'inondation côté val ;

. crête :

- indices de mouvement de terrain (fissures longitudinales, fissures transversales, tassements, ornières, fontis) ;
- repérage des gros terriers ;
- indices de surverse (herbe couchée, ravinement) ;
- vérification de la mise en place des batardeaux ;
- attention particulière à la tenue à la charge de la réhausse (banquette) et/ou des batardeaux (revanche, étanchéité, stabilité) ;
- si un déversement est constaté : longueur, épaisseur et hauteur de la lame d'eau, tenue au ravinement de la crête, de la chaussée ou du déversoir (y compris les bajoyers) ;
- vérification du caractère praticable de la voie de circulation en crête ;

. talus côté fleuve (pour sa partie visible) :

- amorces de glissement ou d'érosion ;
- repérage des gros terriers ;
- tenue à l'érosion du revêtement de protection ;
- repérage de la laisse éventuelle de pointe de crue ;
- vérification de la mise en place des batardeaux ;
- observations sur la surface libre du fleuve (cote ou revanche, direction et vitesse du courant de rive, présence et taille des vagues, remous, ressauts, turbulences, tourbillons, vortex, etc.).

La prise de vue photographique des désordres les plus importants est intéressante si elle peut être effectuée avec un appareil de type Polaroid ou numérique dans le but de disposer de clichés immédiatement exploitables.

Si la digue est équipée de dispositifs d'auscultation à lecture simple, piézomètres notamment, il convient, si possible, de procéder au relevé des mesures, tout au moins pour les instruments qui sont accessibles sans danger.

5.1.4 MODALITÉS DE REPORT ET DE RESTITUTION DES INFORMATIONS

Il semble difficile d'imposer une saisie en fiche directement sur le terrain, tout au moins lorsque l'intervention a lieu en situation de crise. Dans un souci de rapidité, il convient de saisir les informations dans un carnet de notes sous la forme la plus simple, avec au minimum pour chaque observation : une référence PK, un élément de repérage transversal même sommaire (ex : bas - milieu - haut du talus côté val), une description succincte assortie d'un croquis éventuel, la référence des photos prises et la mention de l'heure (en plus de la date du jour). On recommande l'utilisation d'un magnétophone de poche qui permet d'enregistrer rapidement toutes les données listées ci-dessus.

Si l'on dispose d'un plan topographique détaillé de la digue (1/500 ou 1/1000), le repérage consiste à positionner l'observation à l'échelle sur un tirage du document cartographique avec un numéro ou un code renvoyant à une description dans le carnet de notes ou sur la bande magnétique. Il est recommandé également de signaler sur le plan les directions des prises de vue réalisées.

Dans tous les cas, une fois la situation de crise passée, les notes de terrain et/ou les enregistrements, issus de l'inspection en crue, pourront être exploités par le service gestionnaire afin de compléter la connaissance de la levée - sous couvert d'une inspection post-crue destinée à valider les observations en crue (vérification/amélioration du repérage) et à apprécier les dernières évolutions des désordres. Une saisie à ce moment-là des informations (en crue et post-crue) sous forme de fiches permettra leur exploitation ultérieure par les moyens informatiques (statistique, suivi des désordres).

5.1.5 EN RÉSUMÉ

L'inspection en crue présente un double intérêt pour le diagnostic des levées de la Loire :

- elle permet de recueillir des informations sur le comportement en charge des digues habituellement à sec : d'où l'intérêt de faire une inspection visuelle en crue même si la mise en charge n'est que partielle (crue moyenne) ;
- dans les secteurs à haut risque (aléa et vulnérabilité forts), elle permet d'évaluer, puis de suivre, la sécurité de la digue en situation de crise (crue majeure).

Toutefois, les interventions à prévoir pour conduire le diagnostic en crue doivent avoir été définies au préalable dans un plan de vigilance circonstancié où sont précisées toutes les modalités pratiques d'exécution :

- personnel mobilisable par secteur de digue ;
- répartition des tâches entre les exécutants, formation préalable ;
- consignes et matériels de sécurité vis-à-vis des risques encourus par les opérateurs ;
- moyens hélicoptés disponibles ;
- etc.

En l'absence de crue récente, le fonctionnement de ce plan de vigilance mériterait d'être vérifié par la réalisation régulière d'exercices de simulation.

5.2 THERMOGRAPHIE HÉLIPORTÉE

5.2.1 DESCRIPTION ET PRINCIPE DE LA MÉTHODE

Les images dans le domaine de l'infrarouge thermique permettent de visualiser des différences de température de surface. Deux types de phénomènes, intéressants pour le diagnostic des levées, devraient pouvoir être mis en évidence :

- des zones de suintements ou de résurgences sur le talus côté val ;
- des zones privilégiées d'alimentation du fossé de drainage.

Dans le premier cas, on joue sur la différence de température entre les zones sèches du talus aval (qui seront à la température ambiante) et les zones humides qui seront à une température d'autant plus proche de celle de l'eau du fleuve que le remblai est perméable.

L'efficacité de la méthode impose donc d'avoir une différence significative de température entre l'eau du fleuve et le sol sec.

Dans le second cas, on s'intéresse au fossé de drainage s'il existe. En crue, il sera certainement rempli par les eaux ruisselant sur les sols environnants. Mais il est fort probable que ces eaux, en contact avec les sols de surface, seront à une température différente de celle du fleuve (c'est-à-dire plus chaude en été et plus froide en hiver). Les zones de forte alimentation des fossés par le système de drainage des digues se distingueront par une température d'autant plus proche de celle du fleuve que les débits de fuite seront importants et concentrés.

La résolution des appareils actuels de thermographie infrarouge est de l'ordre de quelques dixièmes de degré Celsius et permet donc de voir les contrastes décrits ci-dessus.

L'exploitation temps réel permet de découvrir des anomalies directement exploitables, surtout si elles peuvent être validées par une personne ayant une bonne connaissance du terrain.

Les images infrarouge saisies et stockées pendant la reconnaissance, et couplées éventuellement avec de l'image classique ou une bande son pour faciliter le repérage, doivent ensuite être analysées afin de valoriser toute l'information recueillie. Cette phase doit se faire avec le géotechnicien spécialiste en ouvrages hydrauliques qui pourra orienter l'exploitation des données en fonction de l'objectif recherché : identification de zones perméables dans la digue, localisation de zones

privilégiées d'alimentation du système de drainage. Des validations terrain seront nécessaires et pourront être obtenues en particulier avec les informations issues de l'inspection visuelle en crue.

5.2.2 CONDITIONS D'APPLICATION

Conditions météorologiques

Comme indiqué ci-dessus, cette technique est basée sur la mesure de contrastes thermiques en surface. Vu que l'on ne peut pas jouer sur la température de l'eau du fleuve (que, sous réserve de mesures de contrôle, on doit pouvoir considérer comme constante pendant la durée de la crue), il faut s'adapter à la température de surface du sol sec (ou tout au moins non saturé).

Les conditions optimales pour l'observation du talus côté val seront donc réunies :

- de bon matin lorsque le sol est encore influencé par son refroidissement nocturne ;
- en pleine journée lorsque le soleil est venu réchauffer la surface.

Il apparaît donc que les journées de temps couvert seront a priori peu favorables (faible refroidissement nocturne et faible réchauffement diurne) et le procédé devient inutilisable en cas de pluie, le rayonnement infrarouge étant alors absorbé par l'eau de pluie.

État de surface

La thermographie infrarouge permet d'identifier des contrastes de température en surface. La profondeur d'investigation est très réduite (quelques centimètres tout au plus). Il est donc primordial que le talus de la digue ne soit pas envahi de végétation haute. Des arbres et arbustes en forte densité compromettent le succès de l'opération ou la limitent aux périodes hivernales où la végétation a perdu son feuillage ; le résultat sera optimal avec une végétation rase.

Lorsque les prises de vues se font par temps ensoleillé (ce qui est conseillé), les ombres portées se voient. Dans les zones boisées en pied de digue, on cherchera donc à faire la reconnaissance aux heures de la journée où le talus aval est uniformément éclairé.

Les corps chauds dans l'environnement (mur en béton exposé au soleil, pylône métallique) émettent un rayonnement parasite, mais que l'on peut corriger lors de l'analyse des images.

5.2.3 MOYENS MIS EN ŒUVRE ET COÛTS

Ces moyens sont de trois ordres :

- les hommes ;
- le matériel spécifique ;
- l'hélicoptère.

a) En ce qui concerne les moyens humains, nous connaissons une équipe en France expérimentée dans le domaine de la reconnaissance thermographique aéroportée **appliquée à la géotechnique** : il s'agit de EDF-DTG à Grenoble (contact M. FABRE) dont la principale référence est une reconnaissance de 100 km des digues du Rhin. D'autres équipes ou prestataires existent probablement ou devraient apparaître sur ce marché.

Pour une efficacité optimale de la reconnaissance, il convient d'adjoindre un spécialiste en géotechnique (ouvrages hydrauliques) et un agent de terrain (service gestionnaire des levées) ayant une très bonne connaissance du secteur concerné.

b) Le matériel est constitué de caméras spécifiques ainsi que de tous les appareils nécessaires pour l'enregistrement des images et du son. Il doit être installé sur l'hélicoptère au moyen de dispositifs particuliers de fixation.

c) Enfin, l'hélicoptère sera a priori un appareil loué sur place de façon à minimiser les durées (et donc les coûts) des vols d'arrivée sur site et de retour à la base. La disponibilité d'appareils au niveau local en cas de crise (plan ORSEC par exemple) doit donc être étudiée à l'avance.

Il est à noter que le vol doit se faire dans le respect des règles de sécurité (altitude minimale de 50 m au sol - limites de survol de certaines zones...) et qu'en cas de survol de zones urbanisées (digues à proximité immédiate d'agglomération), il faut alors envisager l'emploi d'un hélicoptère biturbine, beaucoup plus coûteux.

Coûts et rendements

Compte tenu des arrêts nécessaires sur les zones suspectes, on peut estimer que la vitesse d'investigation sera de l'ordre de 10 km/h, peut-être légèrement plus dans des tronçons assez homogènes.

Le coût d'intervention peut être estimé entre 7 et 8 000 F HT par heure de vol sur la base d'un hélicoptère monoturbiné (zone rurale) et non compris le coût horaire du spécialiste géotechnicien.

Il convient d'ajouter le coût de préparation de l'opération puis de dépouillement et d'analyse des images (quelques jours d'ingénieur), ainsi que le coût d'arrivée sur zone et de retour vers la base de l'hélicoptère.

5.2.4 APPLICATION AUX LEVÉES DE LA LOIRE

En général, les grandes crues de la Loire, qui se forment sur le Massif central, présentent un délai de quelques jours entre la formation de la crue et son arrivée dans les zones endiguées.

Sous réserve d'avoir, hors situation de crise et dans le cadre du plan de vigilance, préparé l'intervention avec les diverses parties prenantes (le prestataire de service, les gestionnaires des levées, un géotechnicien en appui), on pourra utilement mettre à profit ce délai de quelques jours pour mobiliser l'hélicoptère, l'équiper avec le matériel spécifique et préparer les détails de l'opération en fonction des prévisions météorologiques.

Une telle reconnaissance visera prioritairement les levées non encore renforcées et les parties jugées peu sûres des levées renforcées. La chronologie de la reconnaissance suivra la progression de la pointe de crue, avec si possible un léger retard (par exemple un jour) pour bénéficier de la saturation maximale des levées.

Pour obtenir les meilleures conditions de contraste thermique et d'exposition, le suivi des conditions météorologiques est primordial. Enfin, les levées couvertes d'une abondante végétation seront a priori exclues de ces reconnaissances.

5.3 INSPECTION VISUELLE POST-CRUE

5.3.1 JUSTIFICATION ET PRINCIPE DE LA MÉTHODE

L'objectif général de l'inspection post-crue est de répertorier, repérer et évaluer les désordres ou présomptions de désordre liés plus ou moins directement à l'état «de charge» que vient de connaître la levée. *Il s'agit en quelque sorte d'une inspection de routine particulière, réalisée juste après la crue, permettant de révéler les zones de faiblesse de l'ouvrage (en complément de celles décelées lors des inspections à sec) et/ou, si on intervient après une (ou des) inspection(s) en crue, de valider, vérifier et compléter les informations recueillies lors de celle(s)-ci.*

Le principe de la méthode consiste à parcourir un linéaire de digue ayant été récemment en charge, suite à une crue du fleuve. Il se peut donc que cette inspection succède à une (ou plusieurs) inspection(s) en cours de crue effectuée(s) sur toute ou partie du linéaire concerné : dans ce cas, elle va permettre de vérifier et compléter les informations recueillies alors. Par rapport à l'inspection à sec, l'inspection post-crue présente l'avantage de pouvoir fournir d'intéressants éléments sur les désordres ou leurs évolutions liés à des caractéristiques du sol en profondeur (ex : zones de plus grande perméabilité dans le corps de digue, indices d'érosion interne, ...) et/ou au comportement du fleuve lors de sa crue récente au droit de la levée (ex : surverse, érosion de berges, etc.).

5.3.2 CONDITIONS ET MOYENS DE MISE EN ŒUVRE

L'inspection post-crue peut être mise en œuvre, par principe, dans tous les terrains quelles que soient les difficultés d'accès mais *son efficacité, tout comme son rendement, s'avèrent étroitement dépendants de l'état d'entretien de la végétation de la digue, au moment (imposé) de l'inspection.* Comme ce moment n'est pas connu à l'avance et comme on ne dispose que d'un délai court pour réaliser l'opération, le seul moyen de garantir de bonnes conditions de visibilité consiste à assurer un entretien soigné et permanent de la digue et de ses abords.

La préparation, l'organisation et la conduite de l'inspection visuelle post-crue de la digue relèvent, en principe, du service gestionnaire des ouvrages. Néanmoins, dans la mesure où il est primordial d'effectuer cette visite dans les meilleurs délais après la crue, le gestionnaire peut recourir, pour des questions d'efficacité, à des personnels relevant d'autres services, voire à un prestataire de services.

Dans le cas où la visite proprement dite n'est pas réalisée par le personnel du gestionnaire, il convient au minimum d'associer celui-ci à la phase de préparation et de restitution des travaux.

En guise de préparation de la visite d'inspection, on réunit les documents topographiques à jour (à la date de la dernière visite de routine) - ou éventuellement dressés depuis - qui en serviront de support. On analyse, après les avoir collectées, l'ensemble des fiches et pièces de compte-rendu des précédentes visites - y compris du (ou des) inspection(s) en crue s'il y en a eu - et ce, afin de pointer les éléments particuliers dont il faudra contrôler l'évolution lors de la visite prochaine.

L'équipe de terrain est formée de deux ou trois agents dont un au moins compétent en génie civil / mécanique des sols : l'intervention au minimum en binôme s'avère souhaitable, voire indispensable, pour le transport du petit matériel, pour la réalisation, dans de bonnes conditions, des levés rapides et, enfin, pour la sécurité des opérations.

5.3.3 LES POINTS À OBSERVER ET INFORMATIONS À RÉPERTORIER

Les désordres, dont on recherche plus particulièrement les indices, peuvent résulter des contraintes hydrauliques ou mécaniques externes subies par la digue (charge hydraulique, surverse, courant de rive, vagues) ou des mécanismes internes déclenchés par la mise en eau (circulations d'eau à travers ou sous le corps de digue, état de saturation, courants hydrauliques, pressions interstitielles) soit, partie par partie de la levée :

. talus côté val :

- amorces ou indices de mouvement de terrain (fissures, bombements, affaissements) sur le talus ou son revêtement éventuel ;
- repérage des gros terriers ;
- indices de surverse (herbe couchée, ravinement) ;
- zones humides ou saturées, rigoles et indices de fuites sur le rampant du talus ou de son revêtement, aux débouchés des terriers, des canalisations, du drain du confortement aval, des ouvrages singuliers (batardés ou non) et au-delà du pied de talus (fossés, canaux, dépressions) ;
- turbidité des eaux de tous les écoulements résiduels ;
- si un déversement s'est produit : relevé des laisses de crue ;

. crête :

- indices de mouvement de terrain (fissures longitudinales, fissures transversales, tassements, ornières, fontis) ;
- repérage des gros terriers ;
- indices de surverse (herbe couchée, ravinement) ;
- stabilité de la réhausse ;
- si un déversement s'est produit : relevé des laisses de crue sur la crête, résistance au ravinement de la crête, de la chaussée ou du déversoir (y compris les bajoyers) ;
- vérification du caractère praticable de la voie de circulation en crête ;

. talus côté fleuve (y compris les parties immergées lors de la crue) :

- amorces de glissement ou d'érosion ;
- repérage des gros terriers ;
- relevé de la laisse de crue ;
- tenue à l'érosion du revêtement de protection ;
- érosion, affouillement en pied de talus ;
- état de la protection de pied de talus (rideau de pieux ou de palplanches,...) si elle existe ;
- singularités topographiques au delà du pied de talus (érosions de berge, dépôts alluvionnaires, fontis) ;
- modification du lit mineur (vérification de la distance du pied de digue au lit par rapport à l'état antérieur) ;
- levé de la cote du lit mineur au jour de la visite.

Si la digue est équipée de dispositifs d'auscultation à lecture simple, piézomètres notamment, il convient de procéder au relevé des mesures (éventuellement en deux temps si une intervention préalable s'avère nécessaire : par exemple, nettoyage des piézomètres dont la tête a été submergée lors de la crue).

Les riverains, rencontrés au hasard de la visite, doivent être interrogés sur le fonctionnement de la digue lors de la crue. La teneur des témoignages ainsi recueillis est reportée dans les zones de commentaires des fiches de désordres.

5.3.4 MODALITÉS DE REPORT ET DE RESTITUTION DES INFORMATIONS

Les opérateurs de l'inspection post-crue utilisent des fiches standard de relevé des désordres, mises à leur disposition par le gestionnaire des digues. Il s'agit du même modèle de fiche que celui utilisé pour les inspections à sec. On peut également accélérer la prise d'informations en employant un magnétophone de poche.

Les désordres inventoriés sont repérés et numérotés, partie par partie d'ouvrage, directement sur un tirage du plan topographique au 1/500 (s'il existe), en respectant une légende normalisée. Les numéros renvoient à des lignes successives des fiches de relevé des désordres où sont portées les annotations de détail et où l'on code les principales informations. Dans le cas où l'on ne dispose pas de plan topographique précis, le travail s'effectue uniquement sur la base de profils en travers repérés en PK.

Des nouveaux profils en travers sont levés aux sections où sont apparues de fortes évolutions suite à la crue (ex : érosion ou glissement d'un talus de la digue, rapprochement du lit mineur du fleuve). Ces profils sont dessinés au verso des fiches et sont repérés suivant le PK de référence qui a été retenu.

Il est, en outre, établi un dossier photographique complet, parfaitement légendé :

- photos de désordre, référencées par le numéro de désordre ;
- photos d'ensemble.

Au bureau, ces informations sont, par la suite, mises au propre (ou reportées en cas d'enregistrement sur magnétophone) et archivées.

5.3.5 RENDEMENT PRÉVISIBLE

Le rendement global est sans doute inférieur à celui d'une inspection de routine dans la mesure où la visite post-crue est susceptible de se dérouler à un moment défavorable (période de végétation) et où le nombre d'indices à noter risque d'être beaucoup plus élevé.

Sur le terrain, une équipe de 3 agents entraînés devrait pouvoir parcourir 3 à 5 km par jour. Il faut cependant rajouter, à ce temps d'inspection in situ, celui - probablement équivalent - de la mise au propre des informations au bureau. Ce travail de mise en forme peut d'ailleurs être différé (mais non abandonné !) dans le souci d'inspecter, dans les meilleurs délais après la crue, la totalité du linéaire de digue.

En tout état de cause, le rendement dépend de l'état de la digue et de la qualité du support cartographique disponible pour son suivi : le meilleur rendement étant obtenu avec une digue propre (talus débroussaillés et fauchés) et grâce à la possession d'un plan à l'échelle du 1/500 ou 1/1 000.

5.3.6 EN RÉSUMÉ

L'inspection visuelle post-crue constitue une méthode de reconnaissance très efficace pour repérer les désordres visuels pouvant résulter de la charge récente supportée par la levée et, donc, relever des indices de dysfonctionnement invisibles avant toute crue.

Elle doit être réalisée dans les meilleurs délais après la crue, afin de bénéficier de toute la fraîcheur des indices (zones humides, laisses de crue, érosions, mouvements de terrain, etc.) et avant que ceux-ci ne

s'estompent ou ne s'effacent. Son efficacité tout comme son rendement dépendent de l'état d'entretien de la digue.

Dans le contexte des levées de la Loire, l'inspection post-crue se révèle indispensable pour recueillir des informations sur le comportement en charge des digues habituellement à sec : d'où l'intérêt de faire une inspection après une crue sur la totalité du linéaire, même si la mise en charge ne fut que partielle (crue moyenne) et surtout si aucune inspection en crue n'a pu être conduite.

5.4 MÉTHODES GÉOPHYSIQUES APPLIQUÉES EN CONDITIONS POST-CRUE

L'efficacité de la plupart des méthodes géophysiques (se reporter aux fiches méthodes en annexe 1 du présent rapport) est limitée par les faibles contrastes de résistivité de la zone prospectée : c'est le cas des digues à sec.

Par contre, lorsque la levée supporte - ou vient de supporter - une charge hydraulique, il est probable que les contrastes de résistivité soient accentués dans le corps de digue grâce à la présence d'eau interstitielle (couches saturées ou zones de circulations préférentielles à l'origine de fuites). On peut donc penser que, dans de telles conditions, les méthodes géophysiques s'avèrent plus discriminantes que lors de leur mise en œuvre à sec.

S'il semble peu réaliste de l'envisager pendant le déroulement même d'une crue importante, une prospection géophysique des levées pourrait avantageusement être effectuée après la crue et ce, au moins à titre d'essai sur des tronçons bien choisis - la seule contrainte étant de pouvoir opérer dans les jours suivant la crue, c'est-à-dire avant que le corps de digue ne se vide de son eau.

Comme pour la prospection à sec, l'intervention pourrait se baser sur l'association de la méthode électromagnétique EM34, du radar géologique avec deux antennes et/ou de la RMT (radio magnétotellurique).

Le choix des secteurs de levée à prospecter se porterait préférentiellement sur des zones où des fuites ou des désordres mécaniques (affaissements ou glissements du corps de digue) ont été observés au cours de la crue.

Dès lors, l'interprétation des résultats de cette prospection géophysique post-crue s'intéresserait plus particulièrement aux deux aspects suivants :

- comparaison avec les résultats issus de la prospection géophysique conduite à sec sur la même zone ;
- croisement des informations (et notamment des anomalies détectées suite à la comparaison précédente) avec celles émanant de l'inspection visuelle réalisée en cours - ou après - la crue.

A titre d'expérience, une telle intervention pourrait être programmée même à l'occasion d'une crue moyenne (comme celle subie par la levée du Val de l'Authion en janvier 1994) pour peu que la mise en charge ait entraîné une saturation partielle du corps de levée et un début de dysfonctionnement de l'ouvrage (fuites ou suintements).

Chapitre 6

Recueil de fiches relatives aux différentes méthodes de reconnaissance des levées

INSPECTION VISUELLE ET TOPOGRAPHIE

■ *Méthodes de reconnaissance des levées à sec*

- ♦ Topographie
- ♦ Reconnaissance visuelle initiale
- ♦ Inspection visuelle de routine

■ *Méthodes de reconnaissance des levées lors des crues*

- ♦ Inspection visuelle en crue
- ♦ Inspection visuelle post-crue

MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

- ♦ Tableau de synthèse des méthodes géophysiques
- ♦ Géophysique - Sismique réfraction
- ♦ Électromagnétisme à émetteur/récepteur portatif mobile EM 31
- ♦ Électromagnétisme à émetteur/récepteur portatif mobile EM 34
- ♦ Électromagnétisme à émetteur/récepteur portatif mobile : le radar
- ♦ Résistivité électrique (le sondage électrique)
- ♦ Radio magnétotellurique RMT
- ♦ Résistivités électriques (l'imagerie électrique)

RECONNAISSANCES GÉOTECHNIQUES

- ♦ Pénétromètre dynamique léger à enregistrement numérique (Panda)
- ♦ Essai de perméabilité Lefranc
- ♦ Perméafor
- ♦ Phicomètre
- ♦ Forages mécaniques
- ♦ Essais de laboratoire

INSPECTION VISUELLE ET TOPOGRAPHIE

■ Méthodes de reconnaissance des levées à sec

Nom de la méthode : Topographie - page 1/3

OBJECTIFS GÉNÉRAUX

La reconnaissance topographique des digues répond à plusieurs objectifs :

- ♦ connaissance du profil en long de la digue permettant d'apprécier sa vulnérabilité par rapport au risque de déversement en crue (comparaison du profil de la crête de digue et des lignes d'eau de référence) ;
- ♦ connaissance des profils en travers de la digue : appréciation, en liaison avec les caractéristiques géotechniques, des conditions de stabilité et du risque de renard en crue ;
- ♦ outil de gestion et de maintenance de l'ouvrage : support de l'inspection visuelle, base de repérage des éléments de suivi de la digue (incidents, entretien, réparation, ...).

Les plans topographiques doivent être rattachés en altimétrie au NGF. Les différents systèmes de PK des digues ainsi que celui relatif à la codification hydrographique adoptée par l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne doivent figurer sur les plans topographiques.

MÉTHODES DISPONIBLES

PROFILS EN LONG ET EN TRAVERS

La reconnaissance topographique minimale consiste en :

- ♦ deux profils en long de la crête, le premier sur la banquette amont constituant le point haut de la crête, le deuxième sur la chaussée. L'espacement des points recommandé est de 20 ou 25 m ;
- ♦ des profils en travers espacés de 100 à 200 mètres en zone homogène (50 à 100 mètres en zone complexe), incluant une bande côté fleuve et côté val de largeur suffisante (une vingtaine de mètres de part et d'autre) ; chaque profil comportera au minimum 12 points. Selon la configuration des points supplémentaires peuvent être nécessaires ;
- ♦ des profils sur les points singuliers (raidissement local, piste d'accès, ouvrages traversant, bâtiments accolés à la levée, ...).

- La précision requise sur les altitudes est $\pm 2,5$ cm.
- La précision requise en plan est de ± 10 cm.
- La méthode classique est le levé géodésique en X,Y,Z effectué par cheminement au théodolite.

Les levés au sol peuvent également être réalisés par GPS (Global Positioning System). Le GPS, servi par une équipe rodée, permet de réaliser des levés de profils avec la précision recherchée et une très grande rapidité. Le choix entre GPS et méthode classique tiendra, outre l'équipement du géomètre, à la nature et à la hauteur de la végétation.

Lorsque le talus côté Loire est en eau de façon permanente, il convient de compléter le profil par bathymétrie, de façon à mettre en évidence les éventuels affouillements. Le niveau d'eau et la date seront notés sur le plan.

Topographie - page 2/3

D'autres éléments peuvent éventuellement être recueillis à l'occasion du levé au sol sans surcoût significatif : photographies de désordres localisés (avec localisation en PK), emplacement en XY des ouvrages, autres singularités.

Les profils seront regroupés dans des cahiers de format A3. Les échelles seront homogènes entre profils. Les fichiers numériques (nom du profil, PK, abscisses relatives, cotes) seront fournis.

PLAN TOPOGRAPHIQUE

Pour le suivi des digues et comme support des inspections visuelles, il est souhaitable de disposer d'un plan topographique des levées. L'échelle 1/500 est la mieux adaptée. Il est également possible d'utiliser le 1/1 000.

Un plan topographique peut être établi par levé au sol ou par photo-restitution à partir de couples de photos aériennes verticales en noir et blanc ou en couleur.

La photo-restitution est recommandée car les photos sont un sous-produit très utile pour le suivi des levées. Pour les échelles recommandées, les photos IGN existantes ne sont pas appropriées et un vol spécifique est nécessaire.

rendu : légende commune normalisée.

PHOTOPLAN

Pour les applications hydrauliques ou morphodynamiques, la réalisation d'un photoplan du lit majeur peut s'avérer intéressante. L'échelle du 1/5000 est recommandée. Cette échelle permet à la fois une vision synthétique d'un tronçon de rivière et un repérage précis des observations faites sur la digue.

Le photoplan peut constituer le fond topographique utilisé sous S.I.G. pour le suivi de la levée (éléments historique, inspection visuelle, maintenance, travaux de réparation).

Le photoplan est un plan photographique obtenu par rectification et mise en projection (Lambert) de photographies aériennes. Le photoplan associe les qualités d'objectivité et de fidélité de la photographie aérienne (couleur ou noir et blanc) aux possibilités de mesures en plan et en altitude.

Un plan topographique en courbes de niveau peut en effet être établi par photorestitution et superposé au photoplan.

précision requise : ± 1 m en plan et $\pm 0,5$ m en altitude, équidistance des lignes de niveau 2,5 m
format plan topo : DXF géocodé en Lambert ou au format SIG (MAPINFO ou ARCINFO).
format photoplan : TIF

Les négatifs de prises de vue doivent être fournis.

Topographie - page 3/3

TEXTES RÉGLEMENTAIRES

ARRÊTÉ INTERMINISTÉRIEL fixant les conditions d'exécution et de publication des levés de plans établis par les services publics (journal officiel du 2 juin 1948).

ARRÊTÉ INTERMINISTÉRIEL fixant les signes conventionnels à employer dans la rédaction des plans à grande échelle pour le compte des services publics (journal officiel du 8 juin 1957).

ARRÊTÉ du 21 janvier 1980 fixant les tolérances applicables aux levés à grande échelle établis par les services publics et INSTRUCTION du 28 janvier 1980 relative à l'application de cet arrêté.

ÉLÉMENTS DE COÛT

L'estimation des coûts des prestations topographiques peut être établie sur les bases suivantes :

profil en long (2 profils - 1 point tous les 25 m) :	1 500 F/km (HT)
profil en travers avec banquettes de 20 m côté Loire et côté val :	750 F/profil (HT)
plan topographique au 1/500 par restitution photogrammétrique : (hors vol photo)	600 F/ha (HT)
plan topographique au 1/1000 par restitution photogrammétrique : (hors vol photo)	325 F/ha (HT)
plan topographique au 1/500 par levés au sol :	3 000 F/ha (HT)
plan topographique au 1/1 000 par levés au sol :	1 800 F/ha (HT)
photoplan numérique au 1/5 000 (bande de 5 km de largeur) à partir d'une prise de vues au 1/25 000 :	4 000 F/km (HT)

Authion : 40 km 1 profil tous les 50 m

456 000 F H.TVA ; soit 570 F/profil



Exemple de photoplan : Vallée du Briançon avec figuration des casiers hydrauliques de la plaine inondable.

INSPECTION VISUELLE ET TOPOGRAPHIE

■ Méthodes de reconnaissance des levées à sec

Nom de la méthode : Reconnaissance visuelle initiale - page 1/5

PRINCIPE ET DESCRIPTION DE LA MÉTHODE

Le principe de la méthode consiste à parcourir intégralement le linéaire de digue en répertoriant toutes les informations visuelles, d'une part sur les caractéristiques morphologiques externes de la digue et, d'autre part, sur les désordres ou les présomptions de désordres affectant l'une ou l'autre de ses composantes.

CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES

L'ampleur des levés sommaires à effectuer au titre de la reconnaissance visuelle va dépendre bien évidemment des documents disponibles au préalable sur l'ouvrage et ses abords :

a) Cas où l'on dispose d'un levé topographique à jour et précis (de l'ordre du 1/500) :

Le travail se limitera à vérifier et compléter les principales informations topographiques disponibles, ce qui nécessitera de se repérer au fur et à mesure sur le plan existant. Des profils en travers ne seront levés qu'aux sections où il apparaît des singularités non visibles ou mal répertoriées sur le plan (ex. : maison ou construction édifiée à proximité de, sur ou dans la levée). On pensera également à indiquer les niveaux d'eau constatés le jour de la visite (cotes du fleuve et des plans d'eau).

b) Cas où l'on ne dispose que de la carte I.G.N. au 1/25 000 :

Dans ce cas, les informations suivantes peuvent être assez facilement levées sans trop alourdir la reconnaissance visuelle :

- ♦ largeur et dévers éventuel de la crête, emprise de la chaussée éventuelle ;
- ♦ pente et longueur du talus côté fleuve, distance au lit mineur du pied de digue ;
- ♦ pente et longueur du talus côté val ;
- ♦ niveau(x) d'eau le jour de la visite, niveau et/ou laisse de crue ;
- ♦ mention des ouvrages ou constructions présents ainsi que des singularités topographiques (ex. : existence d'une dépression côté val).

Le plus efficace pour ce faire est de lever des profils en travers successifs à l'aide d'un décimètre et d'un clisimètre (appareil optique simple de mesure des pentes, de la taille d'une boussole), débordant assez largement des pieds de talus et se raccordant à un point identifiable de la carte IGN au 1/25000, par hypothèse toujours disponible. Les points singuliers, tels que constructions ou indices de désordres, sont repérés sur le profil en travers et seront ainsi correctement positionnés lors de sa mise au propre au bureau. Le repérage longitudinal des profils peut se faire à l'aide d'un topofil (appareil de mesure des distances à fil perdu), tout en se calant sur le terrain au réseau de PK de la digue.

Reconnaissance visuelle initiale - page 2/5

INDICES DE DÉSORDRE

Il est recommandé de conduire l'inspection des désordres par parcours méthodique de sections en travers successives de la digue.

Les points à observer sont les suivants :

- ♦ *talus côté val* : végétation - amorces de glissement - ravinements - terriers (taille et densité) - débouchés de canalisation - entailles diverses - 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) - existence d'un accès ;

- ♦ *crête* : végétation - fissures longitudinales - fissures transversales - tassements - ornières - fontis - terriers (taille et densité) - existence, nature et état de la réhausse (banquette ou murette), en particulier vérification du contact avec la digue - existence, nature et état du revêtement (déversoir) - ouvrages singuliers - existence d'une route, d'un chemin ou d'un accès ;

- ♦ *talus côté fleuve* : végétation - amorces de glissement ou d'érosion - ravinements - fontis - terriers (taille et densité) - débouchés de canalisation - entailles diverses - ouvrages singuliers - zones humides et points d'eau - laisses de crue - existence, nature et état du revêtement de protection (perré, masque béton, ...) - existence, nature et état de la protection de pied de talus (rideau de pieux ou de palplanches, ...) - singularités topographiques au-delà du pied de talus (érosions de berge, dépôts alluvionnaires, fontis) - existence d'un accès.

Parmi les ouvrages singuliers, une attention particulière mérite d'être portée aux maisons ou constructions situées à proximité de, ou incorporées dans, le corps de digue. Le cas est fréquent dans certains secteurs et il ne faudra pas hésiter à inspecter et à décrire de tels points (qui constituent souvent des zones de faiblesse potentielle de la digue) voire à les cartographier avec précision (repérage en plan et en profil), si le plan topographique disponible ne les a pas, ou incomplètement, pris en compte.

Si la digue est équipée de dispositifs d'auscultation à lecture simple, piézomètres notamment, il convient de procéder au relevé des mesures (éventuellement en deux temps si un entretien ou une remise à niveau préalable s'avère nécessaire).

La prise de vue photographique des désordres les plus importants est intéressante et permettra d'effectuer des comparaisons visuelles avec des clichés pris ultérieurement aux mêmes points. Quelques conseils pour des prises de vue exploitables : utiliser le flash dès que les conditions de luminosité ne sont pas optimales ou si l'on est à contre-jour, disposer un objet à côté du sujet pour donner l'échelle du cliché ; repérer et noter le point ainsi que l'angle de prise de vue.

CARACTÉRISTIQUES ET CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE

En préalable à la visite de reconnaissance, il est indispensable de collecter et d'analyser l'ensemble des documents disponibles se rapportant à la digue : plans topographiques actuels et anciens, rapports d'études, comptes-rendus de travaux, documents historiques (plaintes de riverains, constats de dégâts,

Reconnaissance visuelle initiale - page 3/5

description de brèches, etc.). A cette occasion, un entretien préliminaire avec le gestionnaire ou le surveillant de la digue s'impose. Après la visite, on procédera, si nécessaire, à un nouvel entretien pour discuter des points particuliers apparus à l'inspection visuelle.

Le matériel emporté pour la reconnaissance visuelle se compose :

- ♦ du jeu de cartes I.G.N. au 1/25 000 et des éventuels plans de détail disponibles ;
- ♦ d'un topofil (ou un mètre-ruban de 50 mètres) ;
- ♦ d'un clisimètre et une boussole de poche ;
- ♦ d'une serpe ^(*), un marqueur ^(*) et une bombe de peinture ;
- ♦ d'un pic de géologue, une pelle U.S., un feutre à essence et des sachets à échantillons ;
- ♦ un mètre de poche ^(*) et un mètre-ruban (50 mètres ou, à défaut, 20 mètres) ;
- ♦ un appareil photographique réflex 24 x 36 ^(*) et, éventuellement, un Polaroid ou un appareil numérique ;
- ♦ d'une planchette avec crayon et gomme ^(*) ;
- ♦ d'un jeu de fiches descriptives de désordres et/ou de profils en travers ;
- ♦ d'une demi-douzaine de jalons ;
- ♦ en option : d'une tarière manuelle ;
- ♦ en option (version informatisée de la fiche) : d'un ordinateur portable.

L'équipe de terrain est formée de deux ou trois agents compétents en génie civil / mécanique des sols : l'intervention en binôme minimum s'avère indispensable pour le transport du petit matériel, pour la réalisation dans de bonnes conditions, du levé rapide des caractéristiques géométriques et enfin, pour la sécurité des opérations. L'intervention en trinôme se révèle intéressante pour des raisons d'efficacité lorsque la levée est large et/ou mal entretenue ou dans le cas où l'on ne possède pas la topographie de détail (nombreux profils en travers à lever). Le choix de disposer de personnels qualifiés en « génie civil » constitue, en outre, un gage de plus grande exhaustivité dans l'inventaire des désordres et permet une confrontation des points de vue lors de l'évaluation subjective des risques pour la pérennité de la digue.

Les riverains, rencontrés au hasard de la visite, doivent être interrogés sur le fonctionnement de la digue et les éventuels récents travaux d'entretien réalisés. La teneur des témoignages ainsi recueillis est reportée dans les zones de commentaires des fiches de désordres ou de profil en travers.

MODALITÉS DE REPORT DES INFORMATIONS

Celles-ci vont dépendre de la qualité des supports disponibles pour la visite :

a) Cas où l'on dispose d'un levé topographique à jour et précis (de l'ordre du 1/500) :

Ce cas de figure est celui que nous recommandons pour une reconnaissance et un suivi ultérieur vraiment efficaces (se reporter à la fiche « topographie »). Il est alors envisageable de travailler sur le

^(*) à raison d'un jeu ou appareil par opérateur

Reconnaissance visuelle initiale - page 4/5

terrain directement sur un tirage de ce plan (en renvoyant à des fiches de désordres (cf. chapitre 8) pour les annotations de détail ainsi qu'à des profils en travers levés sur des sections singulières), puis de mettre au propre ultérieurement ces informations au bureau. Les informations à porter sur fiches pourraient être saisies sur le terrain à l'aide d'un micro-ordinateur portable.

b) Cas où l'on ne dispose que de la carte I.G.N. au 1/25 000 :

Un tel cas ne devra se présenter que lorsque le temps et les moyens auront manqué pour effectuer les travaux topographiques initiaux que nous recommandons. La description sur le terrain s'appuiera dès lors sur le levé de profils en travers avec respect d'un maillage systématique de base (exemple : un profil tous les 100 ou 50 mètres), les informations ponctuelles entre profils étant repérées en PK et saisies sur fiche (cf. modèles de fiche chapitre 8). Des profils supplémentaires pourront être levés aux sections singulières (exemple : présence d'un ouvrage ou d'une construction sur, ou dans, le corps de digue, raidissement d'un talus, ...). Tous les profils seront mis au propre au bureau et, au minimum, repérés en PK et sur le meilleur support cartographique disponible.

CONDITIONS D'APPLICATION

La méthode peut être mise en œuvre, par principe, dans tous les terrains quelles que soient les difficultés d'accès, mais *son efficacité, tout comme son rendement, s'avèrent étroitement dépendants de l'état d'entretien de la végétation de la digue*. Il est intéressant à ce titre d'effectuer le travail en dehors de la période de végétation pour bénéficier de conditions de visibilité optimales.

Par définition, elle permet de bien repérer les désordres se révélant par des indices de surface : mouvements ou accidents de terrain (au sens le plus large), érosions et ravinements, zones de végétation singulière, terriers de fouisseurs, sorties de canalisation, etc... et demeure probablement, dans ce strict domaine, la plus performante comparée aux investigations géotechniques.

A contrario, elle ne fournit aucun élément sur les désordres (a priori liés à des caractéristiques du sol en profondeur et/ou au comportement du fleuve en crue au droit de la levée) qui ne produisent pas (ou qui n'ont pas encore produit) d'indices de surface, en particulier pour les cas de digue à sec (exemple : zones de plus grande perméabilité dans le corps de digue ou en fondation, renard hydraulique n'ayant pas débouché, sollicitations par les courants de rive, ...) ou dont les indices ont été effacés (exemple : constructions ou ouvrages enfouis, accident ou mouvement de terrain remodelé, ancienne zone de surverse, ...). Le risque d'inexhaustivité de la méthode est, à ce titre, d'autant plus fort que la dernière mise en charge (grande crue) est ancienne.

COÛT ET RENDEMENT

De 10 à 20 000 francs hors taxes du kilomètre (y compris la préparation de l'opération, la mise au propre des informations et des profils, le développement et le report des légendes des photos) pour une reconnaissance intégrale de la digue et pour une maille de base d'un profil en travers levé tous les 100 mètres. En ce qui concerne les travaux de terrain stricto sensu, compter sur un rendement compris entre 400 et 800 mètres par jour, pour une brigade de 3 agents et selon les difficultés rencontrées.

Reconnaissance visuelle initiale - page 5/5

Le coût de la méthode dépend, en fait, de l'état de la digue et de la qualité du support cartographique disponible au préalable. Le coût le plus bas (10 000 francs HT/km, voire moins) sera obtenu avec une digue propre (talus débroussaillés et fauchés, diagnostic hors période de végétation), ne présentant que peu de points singuliers et grâce à la possession d'un plan à l'échelle du 1/500 ou 1/1000.

AVANTAGES

- ♦ méthode tout-terrain ;
- ♦ coût relativement modéré par rapport à la quantité d'informations a priori récoltables (même pour une digue sur laquelle on ne dispose que de très peu d'informations préalables, en particulier topographiques) ;
- ♦ possibilité d'y associer, sans grand surcoût, quelques sondages rustiques à la tarière à main avec prélèvements d'échantillons.

Dans le contexte Loire, indispensable pour disposer d'un état initial de la levée et pour en percevoir les évolutions ultérieures

INCONVÉNIENTS

- ♦ efficacité et rendement dépendant de l'état d'entretien de la digue ;
- ♦ risque d'une certaine subjectivité des opérateurs à pallier par l'utilisation de fiches de saisie standard et par une formation préalable des intervenants.

Dans le contexte Loire, exhaustivité incertaine sur le plan de l'évaluation des risques pour l'ouvrage, en particulier pour une digue à sec, bon nombre de désordres étant susceptibles d'être latents ou effacés du fait du caractère ancien de la dernière grande crue (1866).

Fiches associées :

- Inspection visuelle de routine
- Inspection visuelle en crue
- Inspection visuelle post-crue
- Topographie
- Dossier type de description avec Fiche de saisie des désordres (Chapitre 8)

INSPECTION VISUELLE ET TOPOGRAPHIE

■ Méthodes de reconnaissance des levées à sec

Nom de la méthode : Inspection visuelle de routine - page 1/5

PRINCIPE ET DESCRIPTION DE LA MÉTHODE

Le principe de la méthode consiste à parcourir un linéaire de digue ayant déjà fait l'objet au minimum d'une reconnaissance visuelle initiale. L'objectif de l'inspection de routine est de répertorier toutes les informations nouvelles ou évolutions apparues depuis la précédente inspection (ou première reconnaissance). Les informations visuelles à vérifier ou à relever concernent, d'une part, les caractéristiques morphologiques externes de la digue et d'autre part les désordres ou les présomptions de désordres affectant l'une ou l'autre de ses composantes.

La périodicité des visites est à fixer en fonction de l'état initial, de la configuration du linéaire de digue concerné et de l'importance des enjeux qu'il protège : par exemple, des visites rapprochées (rythme annuel ou biennal) sont à prévoir pour les secteurs de digue très dégradés ou directement exposés au courant du fleuve, et défendant des zones urbaines. Les dates des visites sont programmées de façon à profiter des meilleures conditions d'observation : après un débroussaillage ou hors période de végétation.

CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES

Par hypothèse, l'inspection se déroule alors que l'on dispose déjà d'un support topographique, mis à jour au cours de la précédente visite. Le travail se limite donc à vérifier et à éventuellement compléter les informations topographiques disponibles, ce qui nécessite de se repérer au fur et à mesure sur les documents existants. On indique également sur les plans et/ou profils les niveaux d'eau constatés le jour de la visite (cotes du fleuve et des plans d'eau).

a) Cas où l'on dispose d'un plan topographique (1/500 ou 1/1 000)

Le plan est mis à jour ou corrigé (exemple : évolution du tracé du lit mineur). Des profils en travers sont levés aux sections où sont apparues de nouvelles singularités (exemple : construction édifiée à proximité de, sur ou dans la levée) ou des mouvements de terrain significatifs.

b) Cas où l'on ne dispose que de la carte IGN au 1/25 000 et d'un carnet de profils

Les profils en travers existants sont repérés sur le terrain et, si nécessaire, actualisés grâce à un levé rapide au clisimètre (appareil optique simple de mesure des pentes, de la taille d'une boussole) et au décimètre. Des profils en travers intermédiaires, débordant assez largement des pieds de talus et se raccordant à un point identifiable de la carte I.G.N. au 1/25 000, sont levés au(x) point(s) où s'observent des évolutions importantes de la digue (constructions, remblais, travaux, érosion de talus, etc.). Le repérage longitudinal de ces profils intermédiaires peut se faire à l'aide d'un topofil (appareil de mesure des distances à fil perdu), tout en se calant sur le terrain au réseau de PK de la digue.

Inspection visuelle de routine - page 2/5

INDICES DE DÉSORDRE

Il est recommandé de conduire l'inspection des désordres par parcours méthodique de sections en travers successives de la digue. L'objectif est d'apprécier l'évolution des désordres repérés lors des précédentes visites (exemple : augmentation de la densité ou de la taille des terriers, agrandissement d'une zone d'érosion, rapprochement du lit mineur du fleuve, etc.) et d'inventorier tout indice nouveau de désordre.

Les points et évolutions à contrôler sont les suivants :

- *talus côté val* : végétation - amorces de glissement - ravinements - terriers (taille et densité) - débouchés de canalisation - entailles diverses - ouvrages singuliers - indices de fuite - zones humides et points d'eau - état du confortement aval et/ou du revêtement de protection s'il(s) existe(nt) - singularités topographiques au-delà du pied de talus (dépression, fontis, fossé, canal) - état ou existence d'un accès ;

- *crête* : végétation - fissures longitudinales - fissures transversales - tassements- ornières - fontis - terriers (taille et densité) - état de la rehausse (banquette ou murette) si elle existe et, en particulier, vérification du contact avec la digue - état du revêtement (déversoir) s'il existe - ouvrages singuliers - état de la route, du chemin ou de l'accès ;

- *talus côté fleuve* : végétation - amorces de glissement ou d'érosion - ravinements - fontis - terriers (taille et densité) - débouchés de canalisation - entailles diverses - ouvrages singuliers - zones humides et points d'eau - laisses de crue - état du revêtement de protection (perré, masque béton, ...) s'il existe - état de la protection de pied de talus (rideau de pieux ou de palplanches, ...) si elle existe - singularités topographiques au-delà du pied de talus (érosions de berge, dépôts alluvionnaires, fontis) - état ou existence d'un accès.

Si la digue est équipée de dispositifs d'auscultation à lecture simple, piézomètres notamment, il convient de procéder au relevé des mesures.

La prise de vue photographique des désordres les plus importants est intéressante et permet d'effectuer des comparaisons visuelles si l'on dispose de clichés antérieurs aux mêmes points. Quelques conseils pour des prises de vue exploitables : utiliser le flash dès que les conditions de luminosité ne sont pas optimales ou si l'on est à contre-jour ; disposer un objet à côté du sujet pour donner l'échelle du cliché ; repérer et noter le point ainsi que l'angle de prise de vue.

CARACTÉRISTIQUES ET CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE

La préparation, l'organisation et la conduite de l'inspection visuelle de routine de la digue relèvent, en principe, du service gestionnaire des ouvrages. C'est, en particulier, ce service qui décide de la périodicité des visites selon les différents secteurs dont il est responsable et ce, en fonction de la connaissance qu'il a de l'état des digues d'après les résultats des précédentes inspections et les interventions éventuellement réalisées (exemple : travaux) depuis la dernière visite. L'idéal est de dresser un planning

Inspection visuelle de routine - page 3/5

annuel des visites en exploitant au maximum la période hors végétation, la plus favorable, surtout pour les secteurs de levée moins bien entretenus. Dans le cas où la visite proprement dite n'est pas réalisée par le personnel du gestionnaire (ce que nous ne conseillons pas), il convient au minimum d'associer celui-ci à la phase de préparation et de restitution des travaux.

En guise de préparation de la visite d'inspection, on réunit les documents topographiques à jour (à la date de la dernière visite ou éventuellement dressés depuis) qui en serviront de support. On analyse, après les avoir collectées, l'ensemble des fiches et pièces de compte-rendus des précédentes visites et ce, afin de pointer les éléments particuliers dont il faudra contrôler l'évolution lors de la visite prochaine.

Le matériel à emporter sur le terrain se compose :

- ♦ du jeu de cartes I.G.N. au 1/25 000 et des documents topographiques de support ;
- ♦ de deux jeux de fiches descriptives de désordres et/ou de profils en travers relatifs respectivement à la dernière inspection et à la visite de reconnaissance initiale ;
- ♦ d'un topofil (ou un mètre-ruban de 50 mètres) ;
- ♦ d'un clisimètre et une boussole de poche ;
- ♦ d'une serpe ^(*), un marqueur ^(*) et une bombe de peinture ;
- ♦ d'un pic de géologue, une pelle U.S., un feutre à essence et des sachets à échantillons ;
- ♦ un mètre de poche ^(*) et un mètre-ruban (50 mètres ou, à défaut, 20 mètres) ;
- ♦ un appareil photographique réflex 24 x 36 ^(*) et, éventuellement, un Polaroid ou un appareil numérique ;
- ♦ d'une planchette avec crayon et gomme ^(*) ;
- ♦ d'un jeu vierge de fiches descriptives de désordres et/ou de profils en travers ;
- ♦ d'une demi-douzaine de jalons ;
- ♦ en option (version informatisée de la fiche) : d'un ordinateur portable.

L'équipe de terrain est formée de deux ou trois agents compétents en génie civil / mécanique des sols : l'intervention en binôme minimum s'avère indispensable pour le transport du petit matériel, pour la réalisation, dans de bonnes conditions, des levés rapides et enfin, pour la sécurité des opérations. L'intervention en trinôme se révèle intéressante, pour des raisons d'efficacité, lorsque la levée est large et/ou mal entretenue ou dans le cas où l'on ne possède pas la topographie de détail. Le choix de disposer de personnels qualifiés en « génie civil » constitue, en outre, un gage de plus grande exhaustivité dans l'inventaire des désordres et permet une confrontation des points de vue lors de l'évaluation subjective des risques pour la pérennité de la digue.

Les riverains, rencontrés au hasard de la visite, doivent être interrogés sur le fonctionnement de la digue et les éventuels récents travaux d'entretien réalisés. La teneur des témoignages ainsi recueillis est reportée dans les zones de commentaires des fiches de désordres ou de profil en travers.

^(*)à raison d'un jeu ou appareil par opérateur

Inspection visuelle de routine - page 4/5

MODALITÉS DE REPORT DES INFORMATIONS

Celles-ci vont dépendre de la qualité du support topographique :

a) Cas où l'on dispose d'un plan topographique (1/500 ou 1/1 000)

Ce cas de figure est celui que nous recommandons pour un suivi vraiment efficace (se reporter aux fiches «Topographie» et «Reconnaissance visuelle initiale»). On travaille sur le terrain directement sur un tirage de ce plan en renvoyant à des fiches de désordres (cf. chapitre 8) pour les annotations de détails ainsi qu'à des profils en travers levés sur des sections singulières. Toutes les informations seront ensuite mises au propre et, si nécessaire, harmonisées au bureau.

Les informations à porter sur fiches pourraient être saisies sur le terrain à l'aide d'un micro-ordinateur portable.

b) Cas où l'on ne dispose que de la carte IGN au 1/25 000 et d'un carnet de profils

La description s'appuie sur le maillage de profils en travers déjà levés (a priori, un profil tous les 100 ou 50 mètres) que l'on repère provisoirement in situ (jalons) et que l'on met à jour. Les informations ponctuelles entre profils sont repérées en PK et saisies sur fiche (cf. modèle de fiche chapitre 8). Des nouveaux profils sont levés aux sections où sont apparues des singularités topographiques importantes (constructions, travaux, etc.) ou des fortes évolutions (exemple : érosion ou glissement d'un talus). Ces profils supplémentaires seront mis au propre au bureau et repérés en PK et sur le meilleur support cartographique disponible.

CONDITIONS D'APPLICATION

La méthode peut être mise en œuvre, par principe, dans tous les terrains, quelles que soient les difficultés d'accès mais *son efficacité, tout comme son rendement, s'avèrent étroitement dépendants de l'état d'entretien de la végétation de la digue*. Il est intéressant à ce titre d'effectuer le travail en dehors de la période de végétation pour bénéficier de conditions de visibilité optimales.

Par définition, elle permet de bien repérer les nouveaux désordres ou leurs évolutions se révélant par des indices de surface : mouvements ou accidents de terrain (au sens le plus large), érosions et ravinelements, zones de végétation singulière, terriers de fousseurs, sorties de canalisation, etc... et demeure probablement, dans ce strict domaine, la plus performante comparée aux investigations géotechniques.

A contrario, elle ne fournit aucun élément sur les désordres (a priori liés à des caractéristiques du sol en profondeur et/ou au comportement du fleuve en crue au droit de la levée) qui ne produisent pas (ou qui n'ont pas encore produit) d'indices de surface, en particulier pour les cas de digue à sec (exemple : zones de plus grande perméabilité dans le corps de digue ou en fondation, renard hydraulique n'ayant pas débouché, sollicitations par les courants de rive, ...) ou dont les indices ont été effacés (exemple : constructions ou ouvrages enfouis, accident ou mouvement de terrain remodelés, ancienne zone de surverse, ...). Le risque d'inexhaustivité de la méthode est à ce titre d'autant plus fort que la dernière mise en charge (grande crue) est ancienne, d'où l'intérêt d'effectuer une inspection en crue et/ou post-crue (se reporter aux fiches correspondantes) dès que l'occasion s'en présente.

Inspection visuelle de routine - page 5/5

RENDEMENT PRÉVISIBLE

Concernant le travail de terrain stricto sensu, on peut espérer un rendement compris entre 4 et 6 km par jour pour une brigade de trois agents entraînés et selon les difficultés rencontrées. Il faut cependant rajouter à ce temps d'inspection in situ, celui (au moins équivalent) de la préparation de la mission et de l'indispensable mise au propre des informations au bureau.

En tout état de cause, le rendement global dépend de l'état de la digue et de la qualité du support cartographique disponible pour son suivi : le meilleur rendement étant obtenu avec une digue propre (talus débroussaillés et fauchés, inspection hors période de végétation) et grâce à la possession d'un plan au 1/500 ou 1/1 000. En outre, après les premières visites de rodage, l'efficacité, et donc le rendement devraient aller en croissant.

AVANTAGES

Méthode tout-terrain, efficace pour repérer et suivre les désordres visuels.

Dans le contexte Loire, nécessaire pour suivre les évolutions externes de la digue ; à réaliser avec une périodicité rapprochée pour les secteurs de digue dégradés (exemple : terriers), exposés (exemple : proximité du lit mineur) et/ou protégeant un enjeu fort.

INCONVÉNIENTS

- ♦ efficacité et rendement dépendant de l'état d'entretien de la digue ;
- ♦ coût et/ou charge de travail pouvant devenir lourds au kilomètre inspecté de façon régulière avec des périodicités rapprochées de visite. Le rythme des visites doit en conséquence être modulé d'un secteur de levée à l'autre, en fonction de l'état de la digue et des enjeux protégés ;
- ♦ risque d'une certaine subjectivité des opérateurs à pallier par l'utilisation de fiches de saisie standard et par une formation préalable des intervenants.

Dans le contexte Loire, exhaustivité incertaine sur le plan de l'évaluation des risques pour l'ouvrage, en particulier pour une digue à sec, bon nombre de désordres étant susceptibles d'être invisibles/effacés (dans la mesure où la dernière crue remonte à 1866) ou d'évoluer de façon latente.

Fiches associées :

- Reconnaissance visuelle initiale
- Inspection visuelle en crue
- Inspection visuelle post-crue
- Topographie
- Dossier type de description avec Fiche de saisie des désordres (Chapitre 8)

INSPECTION VISUELLE ET TOPOGRAPHIE

■ Méthodes de reconnaissance des levées lors des crues

Nom de la méthode : Inspection visuelle en crue - page 1/6

PRINCIPE ET DESCRIPTION DE LA MÉTHODE

Le principe de la méthode consiste à parcourir un linéaire de digue en charge au cours d'une crue du fleuve. Il se peut donc que cette inspection se déroule en situation de crise (alerte de crue, plan ORSEC) et, par ailleurs, porte sur des secteurs n'ayant pas (encore) fait l'objet d'une reconnaissance visuelle initiale.

L'objectif général de l'inspection en crue est de répertorier, repérer et évaluer les désordres ou présomptions de désordres liés plus ou moins directement à l'état « en charge » de la levée, révélant les zones de faiblesse de l'ouvrage (en complément de celles décelées lors des inspections à sec) et/ou susceptibles d'en annoncer la rupture prochaine. Ces désordres peuvent résulter des contraintes hydrauliques ou mécaniques externes subies par la digue (charge hydraulique, surverse, courant de rive, vagues, ressauts et turbulences) ou des mécanismes internes déclenchés par la mise en eau (circulations d'eau à travers ou sous le corps de digue, état de saturation, courants hydrauliques, pressions interstitielles).

Les sources et points de désordre à contrôler sont les suivants :

- *talus côté val* : amorces ou indices de mouvement de terrain (fissures, bombements, affaissements) sur le talus ou son revêtement éventuel - repérage des gros terriers - indices de surverse (herbe couchée, ravinement) - fuites, suintements, zones humides ou saturées et rigoles sur le rampant du talus ou de son revêtement, aux débouchés des terriers, des canalisations, du drain du confortement aval, des ouvrages singuliers (bâtardés ou non) - résurgences au-delà du pied de talus dans les fossés, canaux, dépressions - turbidité des eaux de tous les écoulements décelés - si un déversement est constaté : longueur, épaisseur et hauteur de la lame d'eau, tenue au ravinement du talus ou du déversoir (y compris les bajoyers), extension de l'inondation côté val ;

- *crête* : indices de mouvement de terrain (fissures longitudinales, fissures transversales, tassements, ornières, fontis) - repérage des gros terriers - indices de surverse (herbe couchée, ravinement) - vérification de la mise en place des batardeaux - attention particulière à la tenue à la charge de la rehausse (banquette ou murette) et/ou des batardeaux (revanche, étanchéité, stabilité, comportement des zones de contact) - si un déversement est constaté : longueur, épaisseur et hauteur de la lame d'eau, tenue au ravinement de la crête, de la chaussée ou du déversoir (y compris les bajoyers) - vérification du caractère praticable de la voie de circulation en crête ;

- *talus côté fleuve (pour sa partie visible)* : amorces de glissement ou d'érosion - repérage des gros terriers - tenue à l'érosion du revêtement de protection - repérage de la laisse éventuelle de pointe de crue - vérification de la mise en place des batardeaux - observations sur la surface libre du fleuve (cote ou

Inspection visuelle en crue - page 2/6

revanche, direction et vitesse du courant de rive, présence et taille des vagues, remous, ressauts, turbulences, tourbillons, vortex, etc.).

La prise de vue photographique des désordres les plus importants est intéressante si elle peut être effectuée avec un appareil de type Polaroid ou numérique dans le but de disposer de clichés immédiatement exploitables.

Si la digue est équipée de dispositifs d'auscultation à lecture simple, piézomètres notamment, il convient, si possible, de procéder au relevé des mesures, tout au moins pour les instruments qui sont accessibles sans danger.

Outre la nature des indices de désordre à observer plus particulièrement, l'inspection visuelle en crue se distingue de celle de routine par plusieurs aspects importants :

- elle se pratique sous deux formes, d'ailleurs non exclusives l'une de l'autre :
 - inspection *linéaire* (et éventuellement renouvelée au cours de la crue) d'un plus ou moins large secteur prédéfini afin d'y vérifier le fonctionnement critique de la digue (en situation de crue majeure, avec forte charge sur l'ouvrage et crainte pour sa sécurité) ou, lors de crues modérées ne mettant en charge que partiellement la digue, de parfaire la connaissance de l'ouvrage et de ses défauts d'étanchéité ;
 - inspection *ponctuelle* (et éventuellement répétée) d'une zone restreinte et circonscrite de levée où ont été signalés par des témoins (ou sur laquelle on redoute a priori (exemple : ouvrage singulier)) des désordres (fuites, surverse, ...) et leurs conséquences. Par nature, certaines de ces inspections sont dictées par l'actualité et leur programmation se décide donc à chaud par l'intermédiaire d'une cellule de crise ;
- le moment (et la saison) de la visite est imposé par les événements, et le délai de préparation est plus ou moins court. En conséquence, si les talus de la digue s'avèrent mal entretenus (végétation), on ne disposera guère de temps pour faire effectuer un débroussaillage préalable (d'où l'intérêt d'assurer un entretien régulier des ouvrages afin de maintenir en toutes circonstances des conditions de visibilité optimales) ;
- les observations effectuées au titre de la visite en crue peuvent rentrer dans un processus de gestion de crise et conditionner des procédures d'évacuation de zones de population exposées ou la mise en œuvre de travaux conservatoires avec des moyens manuels ou mécaniques (exemple : obstruction de passage busé, confortements divers, colmatage de brèche). Il est donc nécessaire de couvrir un maximum de linéaire de digue en un minimum de temps, en s'attachant aux points essentiels de la visite, et de disposer, en outre, de moyens de communication rapides ;
- les évolutions à suivre peuvent être rapides et les informations recueillies doivent être rattachées à une échelle de temps fine (de l'ordre de la minute ou à tout le moins du quart d'heure) ;
- *les opérateurs de terrain sont potentiellement exposés à des risques corporels, et des mesures doivent être prises pour assurer leur sécurité.*

Tous ces éléments imposent de définir, hors période de crise, les modalités pratiques de mise en œuvre de l'inspection en crue (plan de vigilance) et si possible, de les tester par des exercices de simulation.

Inspection visuelle en crue - page 3/6

CARACTÉRISTIQUES ET CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE

La préparation et l'organisation de l'inspection visuelle en crue de la digue relèvent en principe du service gestionnaire des ouvrages. Mais s'agissant d'une opération susceptible de s'inscrire dans un processus de crise, la conduite effective des inspections peut faire intervenir des agents extérieurs à ce service, tant au niveau décisionnel qu'opérationnel, et introduit des problèmes de communication et de coordination.

L'essentiel de la préparation de cette mission doit s'effectuer hors et si possible avant la période de crue. Il convient d'abord d'identifier les secteurs ou les points de digue qui feront prioritairement l'objet d'inspection(s) en crue et ce, en fonction de la connaissance que le service gestionnaire a de l'état des digues (grâce à la reconnaissance initiale et aux inspections de routine) et des enjeux qu'elles protègent. Pour chacun d'entre eux sera dressée une check-list sur le déroulement des opérations (repérage PK du secteur ou du point à inspecter, mention et coordonnées PK des points particuliers à contrôler pour une inspection linéaire, aide-mémoire général sur les désordres à observer, fréquence de l'opération si on estime qu'elle doit être renouvelée plusieurs fois en cours de crue).

La check-list mentionnera également les documents et les matériels à emporter par les opérateurs (en s'assurant que le service dispose d'un nombre d'exemplaires suffisant), soit a priori :

- ♦ la (ou les) carte(s) I.G.N. au 1/25 000 et le (ou les) plan(s) topographique(s) de détail ;
- ♦ les documents de comptes-rendus relatifs respectivement à la dernière inspection et à la visite de reconnaissance initiale ;
- ♦ un topofil (ou un mètre-ruban de 50 mètres) ;
- ♦ une boussole de poche ;
- ♦ une montre à fonction chronomètre (*) ;
- ♦ une serpe, un marqueur et une bombe de peinture ;
- ♦ un pic de géologue et une pelle U.S. ;
- ♦ un mètre de poche(*) et un mètre-ruban (50 mètres ou, à défaut, 20 mètres) ;
- ♦ un appareil photographique réflex 24 x 36 et un Polaroid ou un appareil numérique ;
- ♦ une planchette avec crayon et gomme, un carnet de notes ;
- ♦ un magnétophone de poche ;
- ♦ les équipements de sécurité et de communication(*) : gilet de sauvetage, talkie-walkie, téléphone mobile.

L'équipe de terrain est formée de deux agents, dont un au moins compétent en génie civil / mécanique des sols. L'intervention en binôme s'avère indispensable pour le transport du petit matériel, pour la réalisation, dans de bonnes conditions, des levés rapides et enfin, pour la sécurité des opérations. La compétence de l'un des agents en mécanique des sols constitue un garant de la pertinence des observations, mais aussi de l'appréciation des risques à court terme pour la sécurité de l'ouvrage et donc des intervenants eux-mêmes (sécurité de l'inspection).

Il est en fait souhaitable qu'au moins un opérateur par secteur de digue soit clairement identifié au préalable, l'idéal étant bien sûr que celui-ci soit également le gestionnaire courant du dit secteur (responsable des inspections de routine et du contrôle des travaux d'entretien).

(*) à raison d'un jeu ou appareil par opérateur

Inspection visuelle en crue - page 4/6

Quoiqu'il en soit, tout ceci relève de dispositions à consigner dans un plan de surveillance et d'intervention (ou plan de vigilance) devant tenir compte de l'organisation et des moyens courants du service gestionnaire et des moyens supplémentaires mobilisables en situation de crise (et relevant d'autres services).

Le plan de vigilance prévoit également les modalités d'appui hélicopté pour l'inspection visuelle en crue : évacuation/secours des opérateurs, apports de matériel ou matériau pour travaux conservatoires.

MODALITÉS DE REPORT DES INFORMATIONS

Il semble difficile d'imposer une saisie en fiche directement sur le terrain, tout au moins lorsque l'intervention a lieu en situation de crise. Dans un souci de rapidité, il convient de saisir les informations dans un carnet de notes sous la forme la plus simple, avec au minimum pour chaque observation une référence PK, un élément de repérage transversal même sommaire (exemple : bas - milieu - haut du talus côté val), une description succincte assortie d'un croquis éventuel, la référence des photos prises et la mention de l'heure (en plus de la date du jour). On recommande l'utilisation d'un magnétophone de poche qui permet d'enregistrer toutes les informations listées ci-dessus.

Si l'on dispose d'un plan topographique détaillé de la digue (1/500 ou 1/1000), le repérage consiste à positionner l'observation à l'échelle sur un tirage du document cartographique avec un numéro ou un code renvoyant à une description dans le carnet de notes ou sur la bande magnétique. Il est recommandé également de signaler sur le plan les directions des prises de vue réalisées.

Dans tous les cas, une fois la situation de crise passée, les notes de terrain et/ou les enregistrements issus de l'inspection en crue pourront être exploités par le service gestionnaire afin de compléter la connaissance de la levée, sous couvert, si possible, d'une inspection post-crue destinée à valider les observations en crue (vérification/amélioration du repérage) et à apprécier les dernières évolutions des désordres. Une saisie à ce moment-là des informations (en crue et post-crue) sous forme de fiches permettra leur exploitation ultérieure par les moyens informatiques (statistique, suivi des désordres).

CONDITIONS D'APPLICATION

La méthode peut être mise en œuvre, par principe, dans tous les terrains, quelles que soient les difficultés d'accès, mais son efficacité tout comme son rendement s'avèrent étroitement dépendants de l'état d'entretien de la végétation de la digue, au moment (imposé) de l'inspection. Comme ce moment n'est pas connu à l'avance, le seul moyen de garantir de bonnes conditions de visibilité consiste à assurer un entretien soigné et permanent de la digue et de ses abords.

Par définition, l'inspection en crue permet de bien repérer les désordres ou leurs évolutions consécutifs à la mise en charge de l'ouvrage et se révélant par des indices de surface (mouvements de terrain (au sens le plus large), érosions dues au fleuve, fuites et zones humides, etc.) et demeure probablement, dans ce strict domaine, la plus performante comparée aux investigations géotechniques.

Contrairement à l'inspection à sec, elle est susceptible de fournir d'intéressants éléments sur les désordres ou leurs évolutions liés à des caractéristiques du sol en profondeur (exemple : zones de plus grande

Inspection visuelle en crue - page 5/6

perméabilité dans le corps de digue, indices d'érosion interne, ...) et/ou au comportement du fleuve en crue au droit de la levée (exemple : surverse, érosion de berges, ...). Le problème réside dans le fait que le constat de l'un ou l'autre de tels indices peut précéder de très peu une rupture plus ou moins soudaine de l'ouvrage.

L'inspection doit, en conséquence, être conduite dans un souci de sécurité des intervenants et d'efficacité des communications et prises de décision, d'où la nécessité d'un cadre du type « plan de vigilance ».

RÉPARTITION DES MOYENS

Le plan de vigilance identifie explicitement les équipes à mettre en œuvre et, pour chaque équipe, le tronçon de digue à surveiller.

La longueur du tronçon affecté à chaque équipe dépendra de trois facteurs :

- ♦ niveau de sécurité du tronçon déterminé par les études de diagnostic réalisées « à sec ». Un tronçon présentant des désordres ou des faiblesses préalablement identifiés devra faire l'objet d'une surveillance plus soutenue ;
- ♦ conditions de l'observation (et donc temps a priori nécessaire pour la faire) : moyens de circulation sur la levée, état de la végétation ;
- ♦ degré de vulnérabilité des zones protégées par les digues.

On peut considérer en première approche que la longueur d'un tronçon affecté à une équipe donnée ne devrait pas dépasser une vingtaine de kilomètres.

INTÉRÊT DE LA MÉTHODE

Méthode tout-terrain, très efficace pour repérer et suivre en crue les désordres visuels.

Dans le contexte Loire :

- ♦ indispensable pour recueillir des informations sur le comportement en charge des digues habituellement à sec, d'où l'intérêt de faire une inspection visuelle en crue, même si la mise en charge n'est que partielle (crue moyenne) ;
- ♦ indispensable pour surveiller la sécurité de la digue, en situation de crise (crue majeure), dans les secteurs à haut risque (aléa et vulnérabilité forts).

CONTRAINTES

- ♦ efficacité et rendement dépendant de l'état d'entretien de la digue ;
- ♦ exposition des intervenants à un risque corporel (rupture de la digue) : encadrement nécessaire par un agent compétent en mécanique des sols, consignes et matériels de sécurité à prévoir ainsi que soutien hélicopté ;
- ♦ modalités de parcours des équipes et de répartition des tâches à prédéfinir dans un plan de vigilance circonstancié, en fonction de l'état de la digue et des enjeux protégés ;
- ♦ risque d'une certaine subjectivité des opérateurs à pallier par une formation préalable des intervenants et/ou la présence d'au moins un gestionnaire compétent en mécanique des sols.

Inspection visuelle en crue - page 6/6

Dans le contexte Loire :

- ♦ plan de vigilance à mettre au point alors qu'il n'y a pas eu de crue récente susceptible de servir de référence, d'où nécessité de faire appel à des exercices réguliers de simulation ;
- ♦ vérifier la quantité de personnel mobilisable au kilomètre en situation de crise, dans le contexte de l'important linéaire de digues à surveiller.

Fiches associées

- Reconnaissance visuelle initiale
- Inspection visuelle de routine
- Inspection visuelle post-crue
- Topographie

INSPECTION VISUELLE ET TOPOGRAPHIE

■ Méthodes de reconnaissance des levées lors des crues

Nom de la méthode : Inspection visuelle post-crue - Page 1/5

PRINCIPE ET DESCRIPTION DE LA MÉTHODE

Le principe de la méthode consiste à parcourir un linéaire de digue ayant été récemment en charge, suite à une crue du fleuve. Il se peut donc que cette inspection succède à une (ou plusieurs) inspection(s) en cours de crue effectuée(s) sur tout ou partie du linéaire concerné.

L'objectif général de l'inspection post-crue est de répertorier, repérer et évaluer les désordres ou présomptions de désordres liés plus ou moins directement à l'état « de charge » que vient de connaître la levée. Il s'agit en quelque sorte d'une inspection de routine particulière, réalisée juste après la crue, permettant de révéler les zones de faiblesse de l'ouvrage (en complément de celles décelées lors des inspections à sec) et/ou, si on intervient après une (ou des) inspection(s) en crue, de valider, vérifier et compléter les informations recueillies lors de celle(s)-ci.

Les désordres, dont on recherche plus particulièrement les indices, peuvent résulter des contraintes hydrauliques ou mécaniques externes subies par la digue (charge hydraulique, surverse, courant de rive, vagues) ou des mécanismes internes déclenchés par la mise en eau (circulations d'eau à travers ou sous le corps de digue, état de saturation, courants hydrauliques, pressions interstitielles), soit partie par partie de la levée :

- *talus côté val* : amorces ou indices de mouvement de terrain (fissures, bombements, affaissements) sur le talus ou son revêtement éventuel - repérage des gros terriers - indices de surverse (herbe couchée, ravinement) - zones humides ou saturées, rigoles et indices de fuites sur le rampant du talus ou de son revêtement, aux débouchés des terriers, des canalisations, du drain du confortement aval, des ouvrages singuliers (bâtardés ou non) et au-delà du pied de talus (fossés, canaux, dépressions) - turbidité des eaux de tous les écoulements résiducls - si un déversement s'est produit : relevé des laisses de crue ;

- *crête* : indices de mouvement de terrain (fissures longitudinales, fissures transversales, tassements, ornières, fontis) - repérage des gros terriers - indices de surverse (herbe couchée, ravinement) - stabilité de la rehausse et en particulier, vérification du contact avec la digue - si un déversement s'est produit : relevé des laisses de crue sur la crête, résistance au ravinement de la crête, de la chaussée ou du déversoir (y compris les bajoyers) - vérification du caractère praticable de la voie de circulation en crête ;

- *talus côté fleuve (y compris les parties immergées lors de la crue)* : amorces de glissement ou d'érosion - repérage des gros terriers - relevé de la laisse de crue - tenue à l'érosion du revêtement de protection - érosion, affouillement en pied de talus - état de la protection de pied de talus (rideau de pieux ou de palplanches, etc.) si elle existe - singularités topographiques au-delà du pied de talus (érosions de berge, dépôts alluvionnaires, fontis) - modification du lit mineur (vérification de la distance du pied de digue au lit par rapport à l'état antérieur) - levé de la cote du fleuve au jour de la visite.

Inspection visuelle post-crue - Page 2/5

Si la digue est équipée de dispositifs d'auscultation à lecture simple, piézomètres notamment, il convient de procéder au relevé des mesures (éventuellement en 2 temps si une intervention préalable s'avère nécessaire : par exemple, nettoyage des piézomètres dont la tête a été submergée lors de la crue).

Pour le reste, l'inspection se conduit comme une inspection de routine (se reporter à la fiche correspondante).

CARACTÉRISTIQUES ET CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE

La préparation, l'organisation et la conduite de l'inspection visuelle post-crue de la digue relèvent en principe du service gestionnaire des ouvrages. Néanmoins, dans la mesure où il est primordial d'effectuer cette visite dans les meilleurs délais après la crue, le gestionnaire peut recourir, pour des questions d'efficacité, à des personnels relevant d'autres services, voire à un prestataire de services. Dans le cas (non recommandé) où la visite proprement dite n'est pas réalisée par le personnel du gestionnaire, il convient au minimum d'associer celui-ci à la phase de préparation et de restitution des travaux.

En guise de préparation de la visite d'inspection, on réunit les documents topographiques à jour (à la date de la dernière visite de routine ou éventuellement dressés depuis) qui en serviront de support. On analyse, après les avoir collectées, l'ensemble des fiches et pièces de comptes-rendus des précédentes visites, y compris de l'(ou des) inspection(s) en crue s'il y en a eu et ce, afin de pointer les éléments particuliers dont il faudra contrôler l'évolution lors de la visite post-crue.

Le matériel à emporter sur le terrain se compose :

- ♦ du jeu de cartes I.G.N. au 1/25 000 et des documents topographiques de support ;
- ♦ des 2 jeux de fiches descriptives de profil en travers et/ou de désordres relatifs respectivement à la dernière inspection (en crue ou non) et à la visite de reconnaissance initiale ;
- ♦ d'un topofil (ou un mètre-ruban de 50 mètres) ;
- ♦ d'un clisimètre et une boussole de poche ;
- ♦ les documents de comptes-rendus relatifs respectivement à la dernière inspection et à la visite de reconnaissance initiale ;
- ♦ d'une serpe, un marqueur et une bombe de peinture ;
- ♦ une boussole de poche ;
- ♦ une montre à fonction chronomètre (*) ;
- ♦ d'un pic de géologue, une pelle U.S., un feutre à essence et des sachets à échantillons ;
- ♦ une demi-douzaine de jalons ;
- ♦ un mètre de poche(*) et un mètre-ruban métallique de 50 mètres ;
- ♦ un appareil photographique réflex 24 x 36(*) et éventuellement un Polaroid ou un appareil numérique ;
- ♦ une planchette avec crayon et gomme(*) ;
- ♦ un jeu vierge de fiches descriptives de désordres et/ou de profils en travers ;
- ♦ en option : un magnétophone de poche, une tarière manuelle ;
- ♦ en option (version informatisée de la fiche) : un ordinateur portable.

(*) à raison d'un jeu ou appareil par opérateur

Inspection visuelle post-crue - Page 3/5

L'équipe de terrain est formée de deux ou trois agents compétents en génie civil / mécanique des sols. L'intervention en binôme minimum s'avère indispensable pour le transport du petit matériel, pour la réalisation, dans de bonnes conditions, des levés rapides et, enfin, pour la sécurité des opérations ; l'intervention en trinôme se révèle intéressante pour des raisons d'efficacité lorsque la levée est large et/ou mal entretenue ou dans le cas où l'on ne possède pas la topographie de détail. Le choix de disposer de personnels qualifiés en « génie civil » constitue en outre un gage de plus grande exhaustivité dans l'inventaire des désordres et permet une confrontation des points de vue lors de l'évaluation subjective des risques pour la pérennité de la digue.

Les riverains, rencontrés au hasard de la visite, doivent être interrogés sur le fonctionnement de la digue lors de la crue. La teneur des témoignages ainsi recueillis est reportée dans les zones de commentaires des fiches de désordres ou de profil en travers.

MODALITÉS DE REPORT DES INFORMATIONS

La prise d'informations sur le terrain peut être accélérée par l'utilisation d'un magnétophone de poche.

Les modalités de report des informations vont dépendre de la qualité du support topographique :

a) Cas où l'on dispose d'un plan topographique (1/500 ou 1/1 000)

Ce cas de figure est celui que nous recommandons pour un suivi vraiment efficace (se reporter aux fiches **Topographie** et **Reconnaissance visuelle initiale à sec**). On travaille sur le terrain directement sur un tirage de ce plan (en renvoyant à des fiches de désordres (cf. chapitre 8) pour les annotations de détail ainsi qu'à des profils en travers levés sur des sections singulières). Toutes les informations seront ensuite mises au propre, et si nécessaire harmonisées, au bureau.

Les informations à porter sur fiches pourraient être saisies sur le terrain à l'aide d'un micro-ordinateur portable.

b) Cas où l'on ne dispose que de la carte I.G.N. au 1/25 000 et d'un carnet de profils :

La description s'appuie sur le maillage de profils en travers déjà levés (a priori, un profil tous les 100 ou 50 mètres) que l'on repère provisoirement in situ (jalons) et que l'on met à jour. Les informations ponctuelles entre profils sont repérées en PK et saisies sur fiche (cf. modèles de fiche chapitre 8). Des nouveaux profils sont levés aux sections où sont apparues des singularités topographiques importantes (constructions, travaux, etc.) ou des fortes évolutions (exemple : érosion ou glissement d'un talus, rapprochement du lit mineur). Ces profils supplémentaires seront mis au propre au bureau et repérés en PK et sur le meilleur support cartographique disponible.

La prise de vue photographique des désordres les plus importants est fortement recommandée. Quelques conseils pour des prises de vue exploitables : utiliser le flash dès que les conditions de luminosité ne sont pas optimales ou si l'on est à contre-jour ; disposer un objet à côté du sujet pour donner l'échelle du cliché ; repérer et noter le point ainsi que l'angle de prise de vue.

Inspection visuelle post-crue - Page 4/5

CONDITIONS D'APPLICATION

La méthode peut être mise en œuvre, par principe, dans tous les terrains, quelles que soient les difficultés d'accès, mais *son efficacité tout comme son rendement s'avèrent étroitement dépendants de l'état d'entretien de la végétation de la digue*, au moment (imposé) de l'inspection. Comme ce moment n'est pas connu à l'avance, le seul moyen de garantir de bonnes conditions de visibilité consiste à assurer un entretien soigné et permanent de la digue et de ses abords.

Par définition, l'inspection post-crue permet de bien repérer les désordres ou leurs évolutions consécutifs à la mise en charge récente de l'ouvrage et se révélant par des indices de surface (mouvements de terrain au sens le plus large, érosions dues au fleuve, fuites et zones humides, etc.) et demeure probablement, dans ce strict domaine, la plus performante comparée aux investigations géotechniques.

Elle complète avantageusement les inspections de routine à sec puisqu'elle est susceptible de fournir d'intéressants éléments sur les désordres ou leurs évolutions liés à des caractéristiques du sol en profondeur (exemple : zones de plus grande perméabilité dans le corps de digue, indices d'érosion interne, ...) et/ou au comportement du fleuve lors de sa crue récente au droit de la levée (exemple : surverse, érosion de berges, ...).

En définitive, il est fortement recommandé d'organiser ce type d'inspection (qui permet de relever des indices de dysfonctionnement invisibles avant toute crue) et ce, d'autant plus si aucune inspection en crue du linéaire concerné n'a pu être réalisée (pour des raisons matérielles par exemple). La seule contrainte est de conduire cette inspection dans le délai le plus court suivant la crue, afin de bénéficier de toute la fraîcheur des indices de dysfonctionnement (zones humides, laisses de crue, érosions, mouvements de terrain, etc.).

RENDEMENT PRÉVISIBLE

Le rendement global est sans doute inférieur à celui de l'inspection de routine dans la mesure où la visite post-crue est susceptible de se dérouler à un moment défavorable (période de végétation) et où le nombre d'indices à noter risque d'être beaucoup plus élevé.

Concernant le travail de terrain stricto sensu, on peut espérer un rendement compris entre 3 et 5 km par jour, pour une brigade de trois agents entraînés et selon les difficultés rencontrées. Il faut cependant rajouter, à ce temps d'inspection in situ, celui (au moins équivalent) de la préparation de la mission et de l'indispensable mise au propre des informations au bureau. Le travail de mise en forme peut d'ailleurs être différé (mais non abandonné !) dans le souci d'inspecter, dans les meilleurs délais après la crue, la totalité du linéaire de digue.

En tout état de cause, le rendement dépend de l'état de la digue et de la qualité du support cartographique disponible pour son suivi, le meilleur rendement étant obtenu avec une digue propre (talus débroussaillés et fauchés, inspection hors période de végétation) et grâce à la possession d'un plan au 1/500 ou 1/1 000.

Inspection visuelle post-crue - Page 5/5

INTÉRÊT DE LA MÉTHODE

Méthode tout-terrain, très efficace pour repérer après une crue, les désordres visuels pouvant résulter de la charge récente supportée par la levée.

Dans le contexte Loire :

- ♦ indispensable pour recueillir des informations sur le comportement en charge des digues habituellement à sec, d'où l'intérêt de faire une inspection après la crue, même si la mise en charge ne fut que partielle (crue moyenne) et surtout si aucune inspection en crue n'a pu être conduite.

CONTRAINTES

- ♦ efficacité et rendement dépendant de l'état d'entretien de la digue ;
- ♦ à réaliser dans les meilleurs délais après la crue, avant que les indices ne s'estompent ou ne s'effacent ;
- ♦ coût et/ou charge de travail pouvant devenir lourds si le linéaire à inspecter, dans le délai court imparti, est trop grand par rapport au personnel disponible ;
- ♦ risque d'une certaine subjectivité des opérateurs à pallier par une formation préalable des intervenants et/ou la présence d'au moins un gestionnaire compétent en mécanique des sols.

Dans le contexte Loire :

- ♦ Vérifier la quantité de personnel mobilisable au kilomètre, dans les délais de réalisation impartis et dans le contexte de l'important linéaire de digues à visiter.

Fiches associées :

- Reconnaissance visuelle initiale
- Inspection visuelle de routine
- Inspection visuelle en crue
- Topographie
- Dossier type de description avec Fiche de saisie des désordres (Chapitre 8)

Méthode	Mesure	Objectif	Avantage	Contre-indications ou inconvénient	coût F(HT)
Sismique-réfraction	temps de propagation d'une onde sismique de compression générée artificiellement et captée par des géophones régulièrement espacés	. recherche du substratum rocheux . caractérisation de la compacité de la digue	. localisation précise du substratum . estimation quantitative des caractéristiques géotechniques de la digue	. coût relativement élevé . sensible aux environnements bruyants	25 000 à 40 000 F/km
EM 31	conductivité électrique apparente par mesure des champs magnétique et électrique créés artificiellement par un émetteur	. appréciation qualitative de l'hétérogénéité géotechnique des digues . recherche d'objet métallique peu profond	. méthode rapide et peu onéreuse permettant de couvrir de grands linéaires	. pénalisée par le faible contraste de résistivité des digues à sec . interprétation difficile en l'absence de calage par d'autres méthodes	4 500 à 6 000 F/km
EM 34	conductivité électrique apparente par mesure des champs magnétique et électrique créés artificiellement par un émetteur	. appréciation qualitative de l'hétérogénéité géotechnique des digues . recherche d'objet métallique peu profond	. méthode rapide et peu onéreuse permettant de couvrir de grands linéaires . profondeur d'investigation supérieure à EM 31	. idem qu'EM 31 . la surface doit être assez régulière	7 500 à 10 000 F/km (3 mesures par station)
Radar	réflexion des ondes électromagnétiques à hautes fréquences	. recherche d'anomalies petites et fines (canalisation, vide, remblaiement hétérogène...)	localisation d'anomalies petites et fines (canalisation, vide, interface entre couches...)	. surface mal préparée ou irrégulière . milieu conducteur	4 500 à 11 000 F/km (3 antennes)
Radio Magnéto tellurique	conductivité du terrain en fonction de la variation du champ électrique et magnétique produit par un émetteur radio	appréciation de l'hétérogénéité géotechnique des digues	. rapidité des mesures . profondeur d'investigation variable en fonction de la fréquence de mesure	. pénalisée par le faible contraste de résistivité des digues à sec . mauvaise réception ondes radios . réseaux métalliques enterrés,	600 à 1 000 F/km
Sondage électrique	mesure de l'intensité et du potentiel d'un courant continu injecté dans le terrain par des électrodes	recherche de la distribution de résistivité en fonction de la profondeur : identification des couches de terrain	. méthode précise pouvant servir d'étalonnage aux autres méthodes . profondeur d'investigation bien adaptée aux digues (entre 8 et 12 m)	. pollution électrique en milieu urbain . pénalisée par le faible contraste de résistivité des digues à sec	1 000 à 3 500F par sondage
Imagerie électrique	. mesure de l'intensité et du potentiel d'un courant continu injecté dans le terrain par des électrodes . interprétation graphique par logiciel	. image de la distribution des résistivités électriques	. méthode fine à employer pour reconnaître un point particulier (canalisation, ancienne brèche...)	. pollution électrique en milieu urbain . pénalisée par le faible contraste de résistivité des digues à sec	7 500 à 18 000 F par panneau

Tableau de synthèse des méthodes géophysiques

Reconnaissance des levées à sec
MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

Reconnaissance des levées à sec
MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

Nom de la méthode : Géophysique - sismique réfraction - Page 1/3

PRINCIPE DE BASE

Mesure du temps de propagation d'une onde de compression générée artificiellement à la surface du sol et captée par des géophones posés sur le sol régulièrement espacés. Ce temps est mesuré à la précision de 10^{-3} seconde entre le point d'impact, d'où est issu le train d'onde, et les capteurs disposés sur une distance croissante.

Paramètre mesuré : le temps de propagation.

Paramètre défini : vitesse de propagation de l'onde de compression.

Indication sur la qualité géotechnique du matériau (rigidité, compacité, etc...).

Document fourni : coupe en 2D, donnant la répartition des différents horizons en terme d'épaisseur, en fonction de leur vitesse sismique.

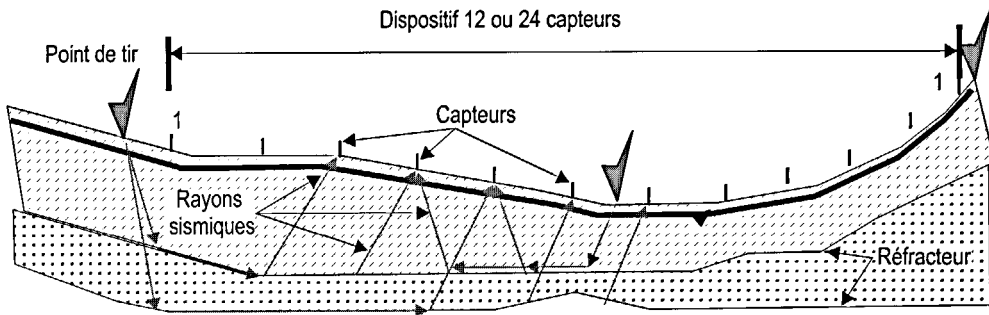


Figure n°1 : Schéma montrant la mise en place d'un dispositif sismique sur le terrain

MODE D'APPLICATION SUR LE TERRAIN

- ♦ par dispositifs unitaires comprenant 12 ou 24 capteurs, disposés consécutivement sur une ligne pour former un profil en long, ou disposés parallèlement les uns aux autres pour couvrir non plus une surface « 2D » mais un volume en « 3D » (dispositifs spéciaux) ;
- ♦ capteurs espacés régulièrement : possibilité de varier l'écartement entre 1 et 20 m selon l'objectif recherché.

La profondeur d'investigation est fonction de l'écartement entre les capteurs et de la distance avec le point de tir. Cela peut donc varier entre 5 et 100 mètres de profondeur. Le choix du nombre de tirs ou de points d'impact est important sur la précision que l'on désire obtenir au niveau de l'interprétation du dispositif. Il est couramment compris entre 5 et 7, mais peut être augmenté à propos en fonction des difficultés locales :

- ♦ source générant le train d'onde de compression : masse, chute de poids, dynamite, ou tout ensemble pouvant créer un impact avec suffisamment d'énergie (fonction de la distance maximum entre point d'impact et le récepteur le plus éloigné) ;
- ♦ rendement moyen de 4 à 8 dispositifs par jour selon l'environnement.

Géophysique - sismique réfraction - Page 2/3

MISE EN ŒUVRE, MATÉRIEL

ÉQUIPE

Au minimum un opérateur géophysicien hautement qualifié et des aides, et un ingénieur superviseur assurant le suivi et l'interprétation.

MATÉRIEL

- ♦ **câbles multiconducteurs** : également appelés flûtes (**fonction** : connexion électrique entre les capteurs et l'enregistreur) ;
- ♦ **géophones** : 12 ou 24 de 4 à 10 Hertz de fréquence propre ;
- ♦ **enregistreur sismique** : avec 12 ou 24 canaux, microprocesseur intégré, écran de visualisation, disque dur et dispositif de sauvegarde sur disquette, imprimante (matériel type : GEOMETRICS ou ABEM pour les plus courants).

Figure n°2 : Appareil sismique type
Strata-view de Geométrics



TRAITEMENT

Manuel ou par l'emploi de logiciels spécifiques. Demande une connaissance approfondie de la méthode (méthode des délais, des intercepts, méthode G.R.M., la plus récente des méthodes d'interprétation). Un premier traitement peut être réalisé sur le terrain.

APPLICATIONS À L'AUSCULTATION DES DIGUES DE LA LOIRE

CONDITIONS FAVORABLES D'EMPLOI

- ♦ distribution croissante des vitesses avec la profondeur ;
- ♦ contraste bien marqué entre les vitesses.

INTÉRÊTS DU CHOIX

- ♦ recherche de la géométrie d'un horizon en 2D ou en 3D ;
- ♦ recherche du substratum calcaire sous la couverture alluviale ; définition en continu du profil en long du toit ;
- ♦ recherche du calcaire. Cela permet de vérifier, entre autres, la présence d'éventuels chenaux ou surcreusements, ou zones fissurées par exemple (développement d'importantes zones karstiques).

Géophysique - sismique réfraction - Page 3/3

LES CONTRE-INDICATIONS D'EMPLOI

- ♦ liées à l'environnement : ⇒ difficulté pour réaliser les enregistrements (influence sur la qualité du travail) ;
- ♦ environnement bruyé : vibrations dues au trafic routier incessant par exemple ;
- ♦ d'ordre géologique : ⇒ difficulté, voire impossibilité de détecter les anomalies ;
- ♦ contraste des vitesses peu marqué, vitesses non croissantes avec la profondeur ;
- ♦ forte inclinaison du réfracteur par rapport à la surface du sol.

ÉLÉMENTS DE COÛTS

Le prix est généralement donné par dispositif de 12 ou 24 capteurs. Il dépend donc du nombre de géophones mais également du nombre de points de tir enregistrés.

EXEMPLE D'UNE FOURCHETTE DE PRIX

Dispositif de base de 12 capteurs espacés tous les 5 mètres, avec 5 tirs enregistrés :

- ♦ **prix moyen constaté** : entre 1 700 et 2 200 francs le dispositif, généralement dégressif pour des campagnes importantes, soit 30 à 40 francs/m.

Dispositif de base de 24 capteurs, espacés tous les 5 mètres, avec 7 tirs enregistrés :

- ♦ **prix moyen constaté** : entre 2 700 et 3 200 francs le dispositif, soit 25 à 30 francs/m.

PRINCIPALES SOCIÉTÉS POUVANT RÉALISER CE TYPE DE PRESTATIONS

- C.E.B.T.P (Département géophysique de Clermont-Ferrand)
- CPGF-HORIZON
- E.D.G.
- GEO-ETUDES
- S.E.G.G-SIMECSOL.

Reconnaissance des levées à sec
MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

Nom de la méthode : Électromagnétisme
à émetteur / récepteur portatif mobile EM 31 - Page 1/4

PRINCIPE DE BASE

Il s'agit de créer dans le sol un champ électrique et magnétique artificiel à partir d'un émetteur portatif (Ex) constitué par une bobine excitée par un courant électrique pulsé dont la fréquence appartient à la gamme des ondes radio et de mesurer les champs induits correspondants par l'intermédiaire d'un récepteur portatif (Rx) situé à une distance fixe de l'émetteur. La mesure s'effectue en déplaçant l'appareil parallèlement au sol en conservant une hauteur constante.

- **Paramètre mesuré** : le champ magnétique et le champ électrique artificiel créés.
- **Paramètre défini** : la conductivité électrique apparente (c'est l'inverse de la résistivité) et le rapport entre le champ magnétique secondaire et le champ primaire généré par l'émetteur.
- **Document fourni** : profils en long (modèle en 2D) donnant la répartition des conductivités apparentes, ou des résistivités apparentes, ou sur plusieurs profils parallèles interprétation en 3D sous forme de carte d'iso-conductivité.
- **Mots clés** : champ électrique, champ magnétique, conductivité (exprimée en millisiemens/mètre ou millimho/m).

Le rapport des champs magnétiques (secondaire /primaire) est défini en partie pour mille (p.p.m.).

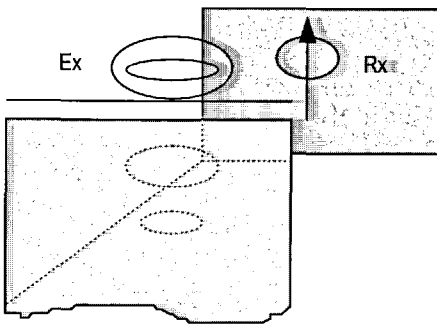


Fig. n° 1 : Schéma du flux des courants induits
Ex = émetteur, Rx = récepteur

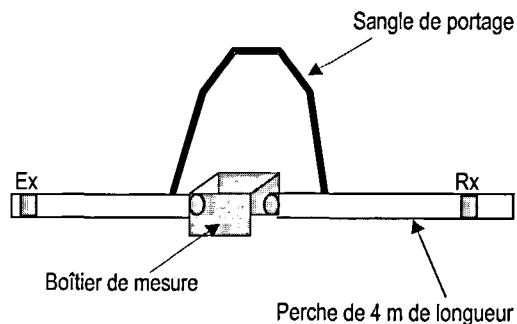


Fig. n° 2 : Appareil de mesure type EM 31
(schéma)

MODE D'APPLICATION SUR LE TERRAIN

- terme couramment employé pour définir l'unité de mesure : la station, au kilomètre, parfois la journée ;
- **application** : la mesure s'effectue en déplaçant l'appareil à hauteur constante, soit le long d'un profil (technique 2D), soit en exécutant plusieurs profils parallèles pour couvrir toute une surface (technique en 3D) ;

Électromagnétisme à émetteur / récepteur portatif mobile EM 31

Page 2/4



Figure n°3 : EM 31 en position de fonctionnement

- **mesure contrôlée** manuellement, avec sélection des stations. Le « pas » de mesure peut être variable
⇒ **profils discontinus** ;
- **mesure automatique** selon un pas régulier et petit défini par programme : ⇒ **profils continus** ;
 - ♦ acquisition en continu possible jusqu'à 10 000 mesures sur un enregistreur numérique optionnel ;
 - ♦ compatibilité avec un PC assurée par logiciel spécifique (transfert et traitement des données) ;
 - ♦ la profondeur d'investigation est fonction de la configuration émetteur/récepteur et du rapport des conductivités des différents horizons dans le sol. Avec l'enregistreur EM 31 on peut estimer la fourchette entre 2 et 6 m, selon que l'appareil est en position normale : champ électrique créé perpendiculaire au sol, ou bien après rotation à 90° de l'ensemble : position de recherche d'anomalie plus superficielle ;
 - ♦ étalonnage : fortement conseillé. Cette méthode fournit une information essentiellement qualitative et globale. Mais on peut établir un étalonnage en réalisant quelques points par sondage électrique classique, aux endroits les plus significatifs afin d'établir une coupe plus fine des conductivités en fonction de la profondeur (structure simple).

MISE EN ŒUVRE, MATÉRIEL

- ♦ Équipe légère comprenant un opérateur géophysicien hautement qualifié.
- ♦ Implantation préalable sur le terrain de repères au sol pour marquage par un « top » électronique du point de mesure, afin de mieux caler topographiquement le profil.
- ♦ Réglages sur site : contrôle des valeurs mesurées par l'appareil et réglages ; calage sur base éventuellement pour annuler les dérives instrumentales.
- ♦ L'enregistreur E.M. : le plus couramment utilisé est l'EM 31 de la firme canadienne Géonics.
- ♦ Matériel portable comprenant une longue perche de quelques 4 m, un enregistreur numérique « Data logger » permettant de stocker jusqu'à 10 000 mesures.
- ♦ Un ordinateur portable pour le transfert sur place des données enregistrées, et le traitement sous forme graphique. Ce traitement peut être réalisé sur le terrain.
- ♦ Rendement moyen de 4 à 8 km par jour selon les possibilités d'accès et de déplacement avec l'appareil et du nombre de mesures réalisées par station (position normale seule, ou avec rotation à 90°).

Électromagnétisme à émetteur / récepteur portatif mobile EM 31

Page 3/4



Figure n°4 : Enregistreur numérique DL 720

APPLICATION À L'AUSCULTATION DES DIGUES DE LA LOIRE

CONDITIONS FAVORABLES D'EMPLOI ET INTÉRÊTS DU CHOIX

♦ Recherche des variations globales de conductivité, détection d'objets métalliques peu profonds :

- surface, ou linéaire important à couvrir ;
- terrain en général dégagé et très accessible permettant une mesure aisée.

♦ Permet d'apprécier l'état d'homogénéité de la digue dans son ensemble en réalisant une grande quantité de mesures. L'effet grand nombre accroît considérablement l'efficacité de la méthode sans la rendre prohibitive au point de vue prix de revient.

♦ En couvrant la digue sur une grande surface et non plus sur un profil, on visualise beaucoup mieux la répartition des zones hétérogènes (aspect qualitatif de la méthode).

♦ La rapidité de la mesure est un atout important (en effet, il n'y a pas de contact physique entre le matériel et le sol), et le fait de pouvoir stocker sur l'enregistreur numérique 10 000 mesures permet d'accroître de façon appréciable le rendement.

♦ Très avantageux dans le cas de structure simple au point de vue conductivité, car si l'on peut bénéficier de quelques points d'étalonnage, une loi conductivité-profondeur peut être établie et permettre ainsi d'obtenir un profil plus quantitatif.

LES CONTRE-INDICATIONS D'EMPLOI

- ♦ Pollution électrique et électromagnétique type lignes à haute tension, émetteur radio puissant proche.
- ♦ Terrain conducteur trop marqué en surface, présence de clôtures métalliques à proximité de la perche.
- ♦ Digue à sec : la conductivité risque d'être peu variable.

PRIX

Le prix est généralement donné par station, point ou par kilomètre de profil, plus rarement à la journée, auquel il faut ajouter l'aménée et repli, le traitement et le rapport.

Électromagnétisme à émetteur / récepteur portatif mobile EM 31

Page 4/4

Exemple d'une fourchette de prix

- entre 30 et 50 francs H.T. lorsqu'il s'agit du point ;
- entre 4 500 F et 6 000 francs H.T. au kilomètre, selon le pas de mesure.

PRINCIPALES SOCIÉTÉS POUVANT RÉALISER CE TYPE DE PRESTATIONS

- C.E.B.T.P (Département géophysique de Clermont-Ferrand) ;
- CPGF-HORIZON ;
- E.D.G. ;
- GEO-ETUDES ;
- S.E.G.G-SIMECSOL ;
- LERM.

Reconnaissance des levées à sec
MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

Nom de la méthode : Électromagnétisme
à émetteur / récepteur portatif mobile EM 34 - Page 1/3

PRINCIPE DE BASE

Il s'agit de créer dans le sol un champ électrique et magnétique artificiel à partir d'un émetteur portatif (Tx) constitué par une boucle parcourue par un courant électrique pulsé dont les fréquences peuvent varier entre 6,4, 1,6 et 0,4 kHz, et de mesurer les champs induits correspondants par l'intermédiaire d'un récepteur portatif (Rx) situé à une distance connue de l'émetteur. La mesure s'effectue en écartant les 2 bobines entre elles selon 3 distances bien définies (10, 20 et 40 m) puis en déplaçant l'ensemble du système.

- **Paramètre mesuré** : le champ magnétique et le champ électrique artificiel créé.
- **Paramètre défini** : la conductivité électrique apparente (c'est l'inverse de la résistivité).
- **Document fourni** : profils en long (modèle en 2D) donnant la répartition des conductivités apparentes ou des résistivités apparentes, ou sur plusieurs profils parallèles, en interprétation en 3D, sous forme de carte d'iso-conductivité.
- **Mots clés** : champ électrique, champ magnétique, conductivité (exprimée en millièmes/mètre ou millimho/m).

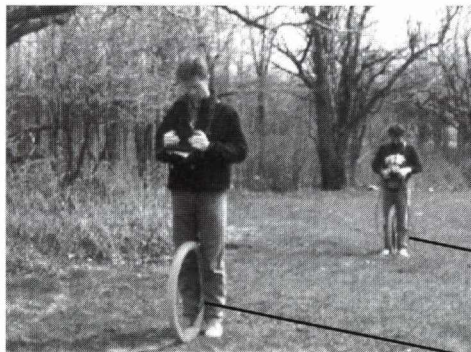


Figure n° 1 : EM 34 en fonctionnement sur le terrain

Espaceur inter-bobines

MODE D'APPLICATION SUR LE TERRAIN

Cet appareil est basé sur le même principe de fonctionnement que l'EM 31, mais permet par contre d'utiliser 3 espacements différents entre bobine émettrice et réceptrice, avec 3 fréquences différentes (6.4, 1.6 et 0.4 kHz), ce qui permet d'augmenter la profondeur d'investigation jusqu'à une soixantaine de mètres (lorsque les conditions le permettent).

Les bobines peuvent être orientées verticalement (comme sur la figure n° 1), et on obtient l'équivalent d'un sondage électrique vertical sur 3 points, mais on peut orienter les bobines horizontalement. Dans ce cas, le système est plus sensible envers les anomalies verticales (type fractures et fissures par exemple), c'est pourquoi il est souvent employé pour l'exploration de l'eau en milieu rocheux fissuré.

Électromagnétisme

à émetteur / récepteur portatif mobile EM 34 - Page 2/3

La station de mesure est considérée au centre du dispositif émetteur/récepteur. Une station peut donc comporter plusieurs mesures (2 à 3 selon les écartements choisis). On peut donc réaliser les mesures selon deux types de configurations : soit en profil linéaire, soit en exécutant plusieurs profils parallèles pour reconnaître une surface.

MISE EN ŒUVRE, MATÉRIEL

Cette technique nécessite la présence de deux personnes (voir figure n° 1).

Les mesures peuvent s'effectuer en continu sur un profil, pour un écartement donné, puis on stocke les données dans l'enregistreur numérique DL 720 par exemple (identique à celui utilisé avec l'EM 31, mais logiciel spécifique pour le traitement des données EM 34), et ainsi de suite pour des écartements différents. Un repérage au sol est nécessaire pour positionner les différents points de mesures.

- ♦ réglage sur site et contrôle journalier pour vérifier la dérive instrumentale, si les mesures durent plusieurs jours ;
- ♦ le matériel : appareil EM 34 fabriqué par la firme GEONICS, un ordinateur portable pour le transfert sur place des données enregistrées, puis le traitement sous forme graphique ;
- ♦ rendement moyen : entre 2 et 4 km par jour, ou 200 à 400 stations, selon le nombre de mesures par station (1 à 3 possibles) et du pas adopté pour l'espacement entre stations.



Figure n° 2 : Enregistreur numérique DL 720

APPLICATION À L'AUSCULTATION DES DIGUES DE LA LOIRE

CONDITIONS FAVORABLES D'EMPLOI ET INTÉRÊTS DU CHOIX :

- ♦ contraste de conductivité suffisamment marqué entre les différents horizons ;
- ♦ terrain généralement dégagé et accessible permettant une mesure aisée ;
- ♦ recherche d'une structure géologique à plusieurs niveaux, définition d'une loi conductivité-profondeur qui permet de suivre plus facilement les variations de la conductivité et donc de mieux cerner les hétérogénéités de la digue en profondeur ;

Électromagnétisme

à émetteur / récepteur portatif mobile EM 34 - Page 3/3

- ♦ bien que moins rapide d'emploi que l'EM 31, la mesure ne nécessite pas de contact avec le sol et offre donc la possibilité de couvrir un grand linéaire ou une surface importante dans une journée ;
- ♦ facilité d'emploi avec l'enregistreur numérique.

LES CONTRE-INDICATIONS D'EMPLOI

- ♦ digue à sec : la conductivité risque d'être peu variable ;
- ♦ d'ordre environnemental : pollution électrique et électromagnétique (lignes à haute tension, émetteur radio puissant à proximité) ;
- ♦ terrain conducteur trop marqué en surface, présence de clôtures métalliques à proximité des boucles.

PRIX

Le prix unitaire définit généralement la station si le nombre est restreint ou le kilomètre si le linéaire est important.

Ce prix est également fonction du nombre de mesures faites sur chacune des stations (entre 1 et 3 mesures). Il faut également ajouter un prix d'amené et de repli plus le traitement et le rapport.

- fourchette de prix concernant la mesure d'une station avec 3 mesures : entre 85 et 120 francs H.T
- pour un profil en long, avec 3 mesures par station : de 7 500 à 10 000 francs H.T. par kilomètre.

PRINCIPALES SOCIÉTÉS POUVANT RÉALISER CE TYPE DE PRESTATIONS

- C.E.B.T.P (Département géophysique de Clermont-Ferrand) ;
- CPGF-HORIZON ;
- E.D.G. ;
- GEO-ETUDES ;
- S.E.G.G-SIMECSOL.

Reconnaissance des levées à sec
MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

Nom de la méthode : Électromagnétisme

à émetteur / récepteur portatif mobile (le RADAR) - Page 1/4

PRINCIPE DE BASE

Méthode basée sur la réflexion des ondes électromagnétiques à haute fréquence. Il s'agit d'une émission d'impulsions électromagnétiques à haute fréquence, à partir d'une antenne émettrice, qui se réfléchissent en totalité ou partiellement sur un ou plusieurs interfaces séparant des milieux à constantes diélectriques différentes. La mesure qui est faite est en réalité une mesure du temps de propagation aller et retour de cette onde électromagnétique réfléchie sur l'interface et qui est captée par une antenne réceptrice. Les fréquences les plus fréquemment utilisées sont comprises entre 20 MHz et 1 GHz.

- Paramètre mesuré : le temps mesuré en général en nanoseconde (10^{-9} seconde).
- Paramètre défini : la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques souvent exprimée en mètres/nanoseconde.
- Document fourni : une coupe-temps avec en abscisse les distances et en ordonnée les temps. Cette coupe peut être transformée en coupe-profondeur si les vitesses ou les constantes diélectriques relatives des milieux rencontrés sont connues.
- Mots clés : radar, onde électromagnétique, réflexion, fréquence, temps, MHz (mégahertz), GHz (gigahertz), nanoseconde (ns).

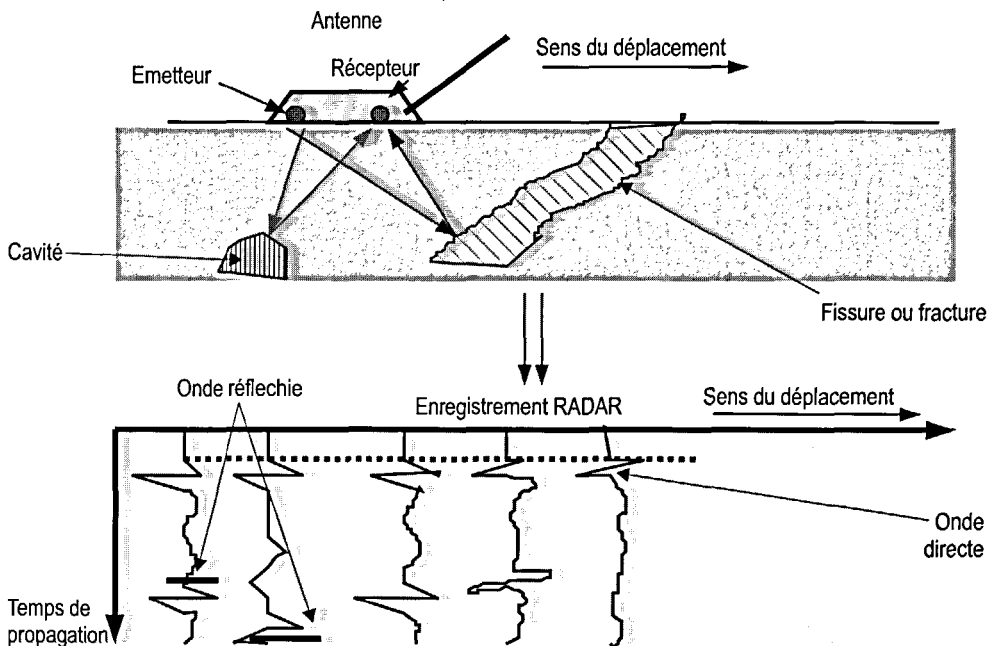


Figure n° 1 : Schéma de principe des réflexions des ondes Radar.

Électromagnétisme à émetteur / récepteur portatif mobile (le RADAR) - Page 2/4

MODE D'APPLICATION SUR LE TERRAIN

♦ Cette méthode est aussi appelée RADAR ou GEO-RADAR de surface (par opposition au système radar utilisé en forage).

♦ L'antenne émettrice/réceptrice est posée sur la surface du sol, puis est tirée lentement mais régulièrement, et par l'intermédiaire d'un câble de liaison, l'enregistreur capte toutes les informations recueillies par l'antenne réceptrice logée dans le même support. L'écran fournit une image du balayage formé par chaque signal dont les déflexions positives sont noircies pour plus de commodité de lecture. Chacun des signaux est appelé « scan ».

♦ La précision obtenue sur le profil sera fonction du nombre de « scan » au mètre. Ce paramètre est directement fonction de la vitesse d'avancement de l'antenne.

♦ Plusieurs types d'antennes existent et peuvent être utilisés en fonction du but recherché. En pratique, les fréquences les plus couramment utilisées sont comprises entre 100 MHz et 500 MHz. Il existe d'autres antennes à fréquences plus élevées de l'ordre du gigahertz, mais leur emploi est souvent plus délicat.

♦ Le choix du type d'antenne est fonction du but à atteindre et de l'environnement géologique sur le site :

- pour une recherche profonde (de l'ordre de quelques mètres à 5-6 m de profondeur), on utilisera plutôt les antennes basses fréquences autour de 100 MHz (meilleure pénétration du signal) ;
- les antennes avec les fréquences les plus élevées, autour de 500 MHz à 1 GHz seront surtout employées si la cible est située à faible profondeur et que l'on recherche plutôt la précision. Toutes informations préliminaires d'ordre géologique (taille et profondeur de l'anomalie recherchée) sont des éléments importants à fournir pour pouvoir établir le programme d'investigation.



- **Profondeur d'investigation** : très variable d'un site à l'autre, dépend de la résistivité du milieu et de la présence ou non d'un horizon conducteur. On peut donner la fourchette de 0,5 à 3-5 m, parfois 7-10 m dans les bonnes conditions.

- **Utilisation principale de ce type d'appareil** : réalisation des profils sur un grand linaire ou bien encore couvrir une grande surface en peu de temps.

Électromagnétisme

à émetteur / récepteur portatif mobile (le RADAR) - Page 3/4

- Rendement moyen de 8 à 15 km/jour selon les difficultés dues à l'environnement (accessibilité du véhicule laboratoire par exemple, et état de surface général sur le profil).

MISE EN ŒUVRE, MATÉRIEL

- ♦ L'équipe sur le terrain nécessite en général deux personnes, dont une très qualifiée pour réaliser de bons enregistrements.
- ♦ Des essais sont souvent exécutés en début de mission sur le site pour définir les meilleurs réglages (pas d'échantillonnage, antenne, vitesse d'acquisition, etc...).
- ♦ Un marquage au sol doit être préparé pour pouvoir marquer par un « top » électronique les enregistrements et permettre ainsi un bon calage sur le profil.
- ♦ Le terrain doit être dégagé au maximum. Tous les obstacles (comme des cailloux, par exemple) qui pourraient notamment provoquer une anomalie lors du passage de l'antenne doivent être retirés. Il faut que l'antenne reste en contact le plus possible avec le sol pour avoir un signal utilisable.
- ♦ Certains appareils sont désormais totalement portables et bien protégés en cas d'intempérie, ce qui permet de s'affranchir en partie des conditions climatiques.
- ♦ Le traitement doit s'effectuer rapidement, le soir même, d'où nécessité d'avoir un ordinateur portable et les logiciels de traitement adaptés. Une bonne connaissance du produit et de la méthode sont nécessaires pour aborder ensuite le travail interprétatif.

- Type de matériel : le SIR -10, le portable SIR 2-M (de GSSI), le système portable RAMAC (d'ABEM).

APPLICATION À L'AUSCULTATION DES DIGUES DE LA LOIRE

CONDITIONS FAVORABLES D'EMPLOI ET INTÉRÊT DU CHOIX

- ♦ Milieu électriquement résistant (fonction du problème posé) :
 - rechercher des anomalies petites et fines ;
 - surface ou linéaire important à couvrir.
- ♦ La rapidité des mesures en fait un outil bien adapté pour les recherches sur des grandes surfaces, mais l'objectif doit être bien défini.

LES CONTRE-INDICATIONS D'EMPLOI

- ♦ Surface mal préparée (végétation, herbes hautes, cailloux, ...).
- ♦ Milieu conducteur : la méthode devient très incertaine lorsque le milieu a une résistivité inférieure à 50-70 Ωm .
- ♦ Objectif mal défini, ou trop profond.

La méconnaissance des conditions géologiques est un élément qui peut être très pénalisant pour la réussite d'une prospection radar.

Électromagnétisme

à émetteur / récepteur portatif mobile (le RADAR) - Page 4/4

PRIX

Le prix est donné selon le volume des reconnaissances soit à l'hectomètre, soit au kilomètre. Les prix varient considérablement d'un site à l'autre :

- Il est fonction du nombre d'antennes passées successivement sur le profil, du nombre de « scan » par mètre. Viennent s'ajouter le traitement par logiciel spécifique et l'interprétation. L'amenée, le repli et l'établissement du rapport sont généralement rémunérés indépendamment du prix de la mesure.

- Une bonne campagne de mesure efficace est souvent le résultat obtenu avec plusieurs antennes et après un traitement optimisé souvent long (travail sur les paramètres).

Prix moyen constaté en 1996

Prix de la mesure :

3 antennes avec une vitesse d'acquisition de 20 scans au mètre + traitement + rapport, hors amenée et repli :

♦ l'hectomètre : de 1 350 à 3 500 francs H.T.

(1 seule antenne = 900 à 1600 F H.T.)

♦ le kilomètre : de 4500 à 11 000 F H.T.

(1 seule antenne = 2 500 à 7 500 francs H.T.)

La part du traitement dans le prix global est importante et est un signe de qualité ; elle peut varier entre 10 et 30% du montant des mesures selon le volume de celles-ci.

PRINCIPALES SOCIÉTÉS POUVANT RÉALISER CE TYPE DE PRESTATIONS (LISTE NON EXHAUSTIVE)

- C.E.B.T.P (Département géophysique de Clermont-Ferrand) ;
- GEOMEGA ;
- GEO-SCAN ;
- LERM.

Reconnaissance des levées à sec
MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

Nom de la méthode : Résistivité électrique (sondage électrique) - Page 1/4

PRINCIPE DE BASE

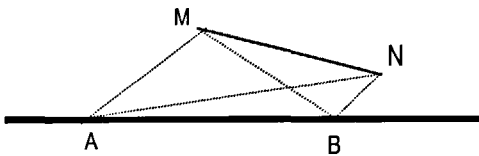


Figure n° 1 : Quadripôle quelconque.

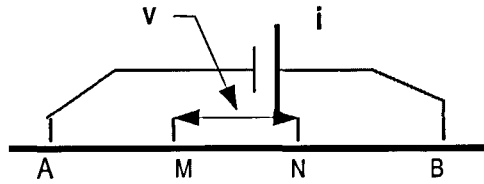
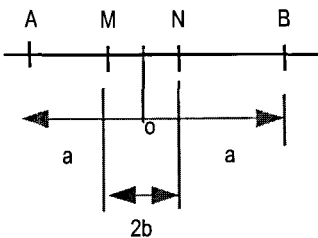


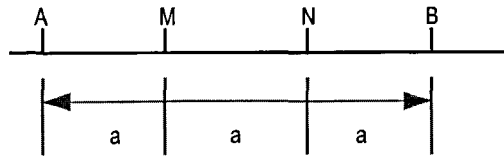
Figure n° 2 : Mesure de la résistivité.

Il s'agit de mesurer la résistivité d'un milieu horizontal en injectant en deux points A et B un courant continu ou alterné à faible fréquence, d'intensité « I » et en mesurant en deux autres points M et N le potentiel résultant (cf. figure n° 6). Les points A, B, M et N constituent ce que l'on nomme un quadripôle. Il en existe de toutes sortes qui portent souvent le nom de leur inventeur. Les systèmes les plus répandus sont les quadripôles SCHLUMBERGER et WENNER.



(AB est grand devant MN)

Figure n° 3 : dispositif SCHLUMBERGER.



(AM=MN=NB)

Figure n° 4 : dispositif WENNER.

- Paramètre mesuré : courant électrique continu, intensité et potentiel.
- Paramètre défini : la résistivité apparente (exprimée en Ωm).
- Document fourni : un sondage électrique donnant la résistivité apparente ou une coupe interprétée donnant la loi résistivité-profondeur.
- Mots clés : quadripôle, courant continu, intensité, potentiel, résistivité, SCHLUMBERGER, WENNER.

Résistivité électrique (sondage électrique) - Page 2/4

MODE D'APPLICATION SUR LE TERRAIN

- La mesure peut se présenter sous deux formes : soit sous forme de « sondage électrique », soit sous forme de « traînée électrique ».

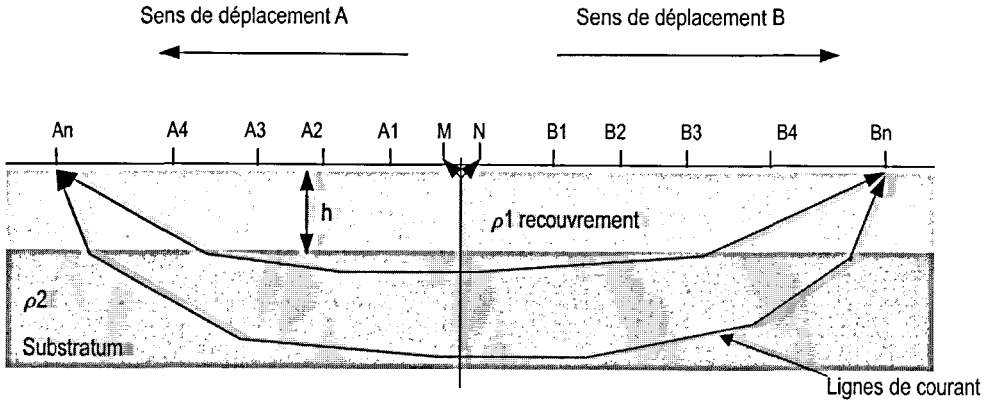


Figure n° 5 : Exemple d'un sondage électrique.

Le sondage électrique permet de réaliser une investigation en profondeur. En effet, au fur et à mesure que les électrodes d'injection A et B s'éloignent, les lignes de courant pénètrent de plus en plus profondément dans le sol.

A chacune des positions des électrodes A et B correspond une mesure et donc une valeur calculable de la résistivité. Cette résistivité est apparente car, si elle dépend de la résistivité vraie du milieu, la configuration du dispositif utilisé entre en jeu.

Les valeurs calculées sont reportées sur un graphique bilogarithmique. Pour le système SCHLUMBERGER, on place en abscisse la valeur $AB/2$ et pour le système WENNER on porte le rapport a/h dans lequel $a = AB/3$ et h représente la valeur de l'épaisseur de la première couche (souvent pris égal à 1 m).

Les valeurs calculées sont données à la verticale du point de mesure (en pratique entre M et N).

En pratique, les deux techniques sont utilisées sur le terrain, mais le système SCHLUMBERGER est le plus utilisé. Le système SCHLUMBERGER offre l'avantage sur le système WENNER de ne déplacer qu'une seule paire d'électrodes A et B, au lieu des deux AB et MN. Les hétérogénéités locales au voisinage des électrodes M et N sont facilement mises en évidence et peuvent être éliminées ou compensées (ce sont les à-coup-de-prises). D'autres systèmes avec électrodes rejetées à l'infini sont également utilisés.

La traînée électrique consiste à utiliser un quadripôle fixe ABMN puis de déplacer l'ensemble le long d'un profil. On n'obtient qu'une seule valeur de la résistivité apparente. Ce système n'est plus guère utilisé maintenant, les méthodes électromagnétiques étant beaucoup plus performantes dans ce domaine.

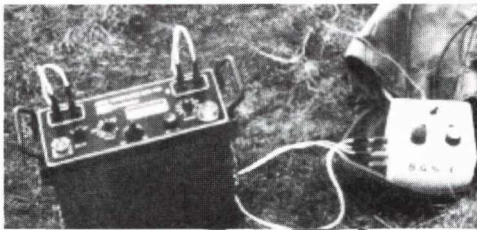
Résistivité électrique (sondage électrique) - Page 3/4

MISE EN ŒUVRE, MATÉRIEL

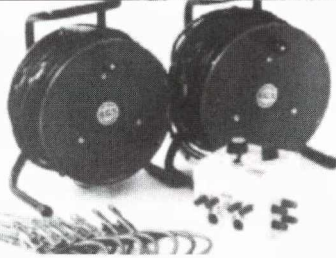
- ♦ équipe comprenant entre 3 et 4 personnes selon les systèmes utilisés ;
- ♦ matériel léger permettant de qualifier la méthode de portable.

L'équipement de base comprend un appareil compact qui permet de faire plusieurs types de mesures comme l'intensité, le potentiel et de compenser automatiquement la polarisation spontanée. En effet lorsque l'on plante dans le sol deux électrodes, un potentiel naturel apparaît entre ces deux points. Ce phénomène bien connu s'appelle la polarisation spontanée et dépend pour l'essentiel des interactions de l'eau et du sol par des effets électrolytiques et chimiques. Cette propriété est d'ailleurs mesurée et utilisée pour certaines reconnaissances.

En pratique, dans les cas d'une utilisation selon la méthode du sondage électrique SCHLUMBERGER, on commence par un écartement petit entre A et B puis, par pas progressif, on déplace A et B jusqu'à une distance qui peut atteindre 200, 500 ou 1 000 et 2 000 m. En Wenner, à chaque nouvelle mesure on déplace les 4 électrodes ; elles sont équidistantes.



← Sélecteur



← Bobines pour l'injection

Électrodes →

Figure n° 6 : Exemple d'un équipement pour la mesure des résistivités électriques.

APPLICATION À L'AUSCULTATION DES DIGUES DE LA LOIRE

CONDITIONS FAVORABLES D'EMPLOI ET INTÉRÊT DU CHOIX

- ♦ contraste des résistivités bien marqué entre les différents horizons ;
- ♦ faibles variations latérales dans un même horizon ;
- ♦ recherche de la distribution des résistivités en profondeur, grande souplesse d'utilisation sur le terrain, la profondeur d'investigation qui concerne les digues (entre 8 et 12 m) est très facilement atteinte
- ♦ méthode d'étalonnage : cela permet d'établir avec une bonne précision la loi résistivité-profondeur qui sert très souvent de base à l'interprétation d'autres méthodes (comme les mesures électromagnétiques, la RMT), ou pour définir la validité d'emploi d'une autre méthode comme le radar par exemple.

Résistivité électrique (sondage électrique) - Page 4/4

LES CONTRE-INDICATIONS D'EMPLOI

- pollutions électriques en milieu urbanisé : lignes à haute tension, courants vagabonds, phénomène de polarisation spontanée trop fort ;
- contraste des résistivités peu marqué (probable dans le cas des digues à sec) ;
- forte hétérogénéité latérale des couches.

PRIX

Les prix sont donnés à l'unité de sondage électrique. Ce prix est fonction de la distance AB, ou AB/2 de la ligne d'injection (facteur déterminant pour la profondeur d'investigation). Il faut en général ajouter un terme pour la modélisation par un logiciel spécifique qui permet une interprétation plus fine. Le prix du rapport est souvent une fraction des mesures, il peut varier entre 5 et 12% du total.

Prix moyen du sondage électrique en système SCHLUMBERGER par exemple :

- avec $AB/2 < 100$ m : de 600 à 950 francs H.T.
- avec $100 < AB/2 < 300$ m : de 850 à 1 050 francs H.T.
- avec $300 < AB/2 < 500$ m : de 1 500 à 2 500 francs H.T.
- au-delà de 500 m : entre 1 800 à 3 500 francs H.T. selon la difficulté de tirer la ligne électrique entre les AB.

PRINCIPALES SOCIÉTÉ POUVANT RÉALISER CE TYPE DE PRESTATIONS

- C.E.B.T.P (Département géophysique de Clermont-Ferrand) ;
- CPGF-HORIZON ;
- E.D.G. ;
- GEO-ETUDES ;
- S.E.G.G-SIMECSOL.

Reconnaissance des levées à sec
MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

Nom de la méthode : Radio magnétotellurique (RMT) - Page 1/4

PRINCIPE DE BASE

Technique récente dont la théorie a été développée pour la première fois par M.L. CAGNIARD en 1953. Il s'agit de mesurer la conductivité (qui est l'inverse de la résistivité) d'un milieu horizontal à partir de la variation d'un champ électrique et magnétique créé artificiellement et produit par les émetteurs radio. C'est le rapport de ces deux valeurs qui permet de calculer la conductivité et/ou la résistivité électrique du sol.

(L'adjectif « tellurique » est un qualificatif qui s'applique plus particulièrement aux courants électriques circulant dans le sol).

- **Paramètre mesuré** : composante horizontale du champ électrique et magnétique d'origine artificielle.
- **Paramètre défini** : la conductivité exprimée en millisiemens/m ou millimho/m.
- **Document fourni** : profil en long montrant la variation de conductivité ou de la résistivité du sous-sol, ou lorsque l'on fait plusieurs profils parallèles, établir une carte d'iso-valeur montrant les zones hétérogènes.
- **Mots clés** : champ électrique, champ magnétique et tellurique, conductivité (exprimée en millimho/m ou millisiemens/m) et résistivité (exprimée en ohm.m).

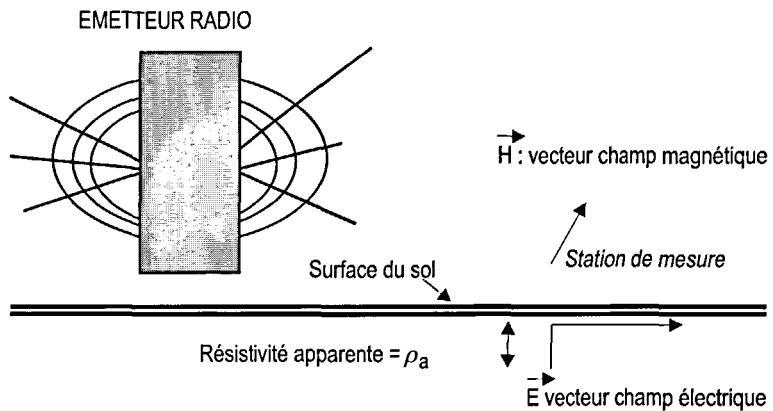


Figure n° 1 : Schéma de principe d'une mesure.

Donc pour une fréquence « f » et en un point donné, l'enregistreur mesure grâce à ses capteurs :

- ♦ la composante horizontale du champ électrique (E) ;
- ♦ la composante horizontale du champ magnétique (H).

La résistivité apparente est obtenue par la relation simple $ra = (Eo/Ho)^2 \times C_1$; C_1 étant une constante pour une fréquence donnée, Eo et Ho étant la valeur de la composante du champ électrique et magnétique au sol. Ils s'expriment respectivement en volts/mètre et ampères/mètre.

Radio magnétotellurique (RMT) - Page 2/4

MODE D'APPLICATION SUR LE TERRAIN

Cette méthode a été développée à partir des travaux de M L. CAGNIARD par deux chercheurs du CNRS de GARCHY en 1973. Le système de mesure se compose d'un traîneau tracté par un véhicule contenant tous les éléments électroniques nécessaires pour enregistrer la mesure. Un tapis d'usure est attaché derrière le traîneau et supporte les électrodes de mesure des champ électrique et magnétique au sol.

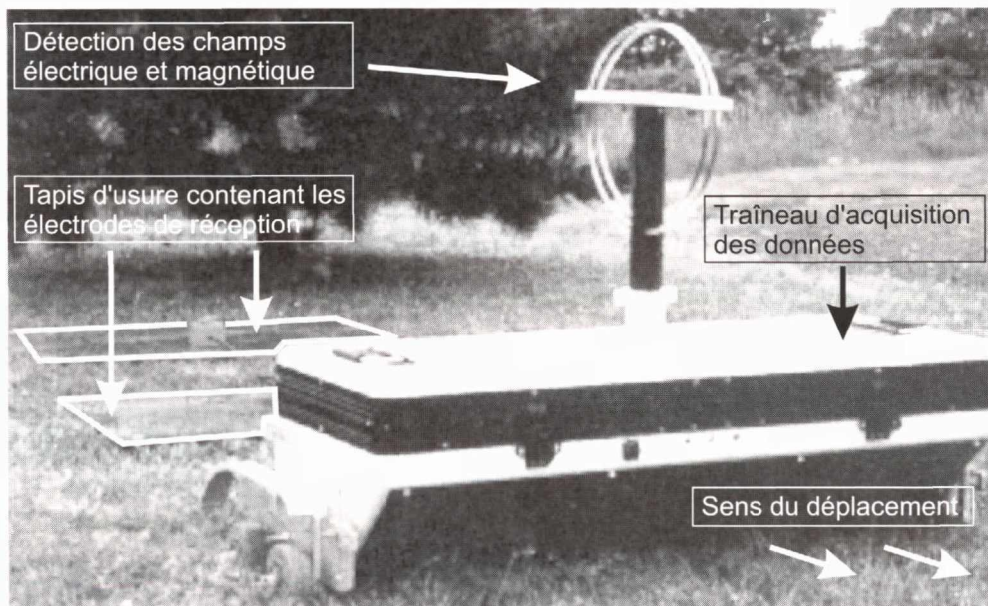


Figure n° 2 : Système en position de fonctionnement.

- ♦ Le système peut se déplacer à une vitesse relativement rapide de quelques kilomètres/heure (c'est une des méthodes géophysiques parmi les plus rapides). On peut en effet enregistrer en continu, l'appareil permettant l'acquisition de plus de 10 000 mesures à l'heure ;

- ♦ La profondeur d'investigation est fonction des résistivités rencontrées et des fréquences utilisées. Cela peut atteindre une cinquantaine de mètres environ en utilisant les émetteurs militaires de basses fréquences. Pour les fréquences des grandes ondes par exemple, on aura une fourchette comprise entre 1-2 m et 12-15 m. Cette variation est fonction de la résistivité des terrains rencontrés.

MISE EN ŒUVRE, MATÉRIEL

Bien que les électrodes soient sur un tapis d'usure conçu à cet effet, il est fortement conseillé de vérifier au préalable la nature du terrain et de le nettoyer de tous les obstacles qui pourraient gêner la progression du tapis. Plus le contact entre le sol et le tapis sera continu, meilleures seront les mesures. L'appareil se tracte donc depuis un véhicule dans lequel on installe l'unité de traitement et l'unité de stockage.

Radio magnétotellurique (RMT) - Page 3/4

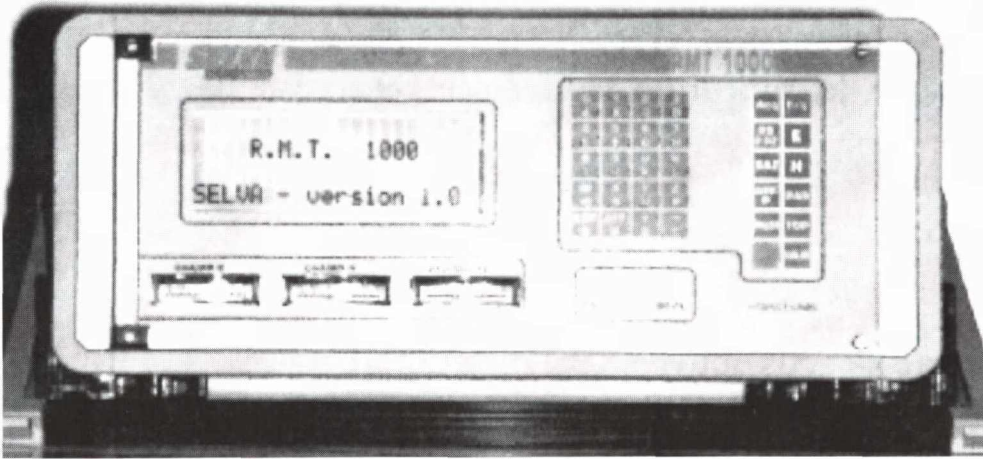


Figure n° 3 : Unité de traitement

- ♦ On peut choisir la fréquence et le pas d'échantillonnage que l'on désire, les gains d'amplification et toute information permettant d'archiver le profil.
- ♦ L'utilisation d'un ordinateur portable connecté au réseau d'acquisition permet de visualiser en temps réel les courbes des résistivités en cours de mesure.
- ♦ Cependant le résultat d'un profil est le plus souvent d'ordre qualitatif. Il peut s'avérer intéressant de réaliser quelques étalonnages par sondages électriques classiques afin de pouvoir le cas échéant produire une loi résistivité-profondeur qui pourrait être très utile et améliorer tout un profil.
- ♦ Un point important est de vérifier sur la totalité du site, particulièrement lorsque le site est très étendu, si la réception de toutes les fréquences que l'on projette d'utiliser est bonne partout.
- ♦ Le rendement est fonction de la qualité de la surface et de l'accessibilité du site : entre 15 et 30 km/jour.
- ♦ Le matériel : soit le matériel SELVA fabriqué sous licence du CNRS de GARCHY, soit celui du laboratoire des Ponts et Chaussées.

APPLICATION À L'AUSCULTATION DES DIGUES DE LA LOIRE

CONDITIONS FAVORABLES D'EMPLOI ET INTÉRÊT DU CHOIX

- ♦ un contraste de résistivité qui soit bien marqué ;
- ♦ une bonne réception des ondes radio dans la gamme des grandes ondes et ondes moyennes ;
- ♦ la rapidité des mesures et donc la potentialité d'en faire un très grand nombre, avec des fréquences différentes pour atteindre une profondeur d'investigation de l'ordre de celle de digues (entre 6 et 10 m) puis de comparer les différentes valeurs entre elles, est un atout que l'on doit utiliser. Néanmoins l'objectif doit être clairement précisé au départ.

Radio magnétotellurique (RMT) - Page 4/4

LES CONTRE-INDICATIONS D'EMPLOI

- ♦ principalement: contraste de résistivité peu marqué ;
- ♦ mauvaise réception des ondes radio dans les fréquences intéressantes ;
- ♦ réseaux métalliques enterrés ;
- ♦ surface trop irrégulière.

PRIX

Les prix sont généralement donnés au kilomètre, parfois à la journée. Ces prix comprennent la mesure et le traitement sur place, et le rapport. Le prix d'amenée et repli est très variable selon la provenance des équipes.

Les prix moyens constatés varient de 600 à 1 000 francs H.T. le kilomètre, ou 12 000 à 15 000 francs H.T. la journée.

PRINCIPALES SOCIÉTÉS POUVANT RÉALISER CE TYPE DE PRESTATIONS (LISTE NON EXHAUSTIVE)

- C.E.B.T.P (Département géophysique de Clermont-Ferrand) ;
- CPGF-HORIZON ;
- GEO-ETUDES ;
- LCPC Nantes.

Reconnaissance des levées à sec
MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

Nom de la méthode : Résistivités électriques (l'imagerie électrique) -

Page 1/4

PRINCIPE DE BASE

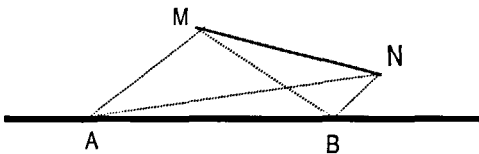


Figure n° 1 : Quadripôle quelconque.

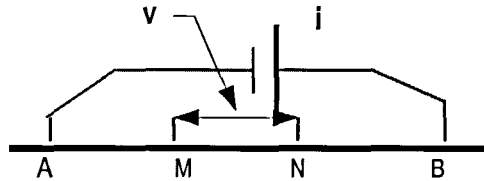


Figure n° 2 : Mesure de la résistivité.

Le principe de base est le même que pour les sondages électriques.

Il s'agit de mesurer la résistivité d'un milieu horizontal en injectant en deux points A et B un courant continu ou alterné à faible fréquence, d'intensité I et en mesurant en deux autres points M et N le potentiel résultant (cf. figure n° 2). Les points A, B, M et N constituent ce que l'on nomme un quadripôle. Le panneau électrique est un système de mesure qui permet d'acquérir en une seule fois l'équivalent de dizaines de sondages électriques qui seraient réalisés côte à côte avec un espacement régulier. C'est le moyen de combiner efficacement le principe du sondage électrique qui permet donc de visualiser les variations de la résistivité avec la profondeur, avec le principe du profil continu qui permet de balayer une grande distance.

On parlera d'imagerie pour le résultat sous forme de coupe résistivité-profondeur après le traitement par inversion mathématique.

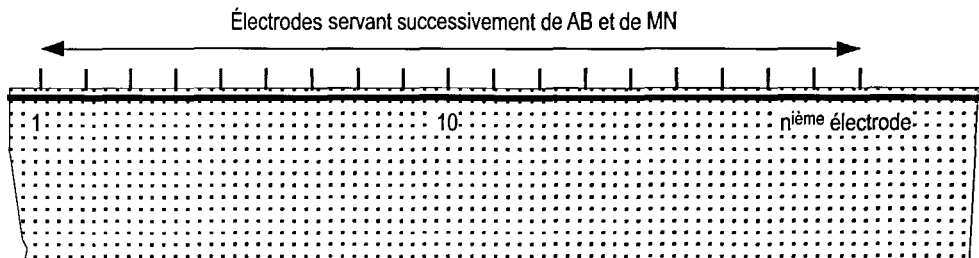


Figure n° 3 : Dispositif multi-électrodes.

Résistivités électriques (l'imagerie électrique) - Page2/4

- **Paramètre mesuré** : courant électrique continu, intensité et potentiel.
- **Paramètre défini** : la résistivité apparente (exprimée en Ωm).
- **Document fourni** : un profil donnant la répartition des résistivités apparentes en fonction d'une pseudo-profondeur ou une coupe interprétée donnant la loi résistivité-profondeur après inversion mathématique.
- **Mots clés** : quadripôle, courant continu, intensité, potentiel, résistivité, SCHLUMBERGER, WENNER.

MODE D'APPLICATION SUR LE TERRAIN

Un ensemble d'électrodes formant une unité physique sera souvent désigné par le terme de base ou dispositif électrique.

- ♦ Le système est piloté par un ordinateur qui sélectionne le couple d'électrodes entre lesquelles il fera passer le courant (couple AB) et le couple où il mesurera le potentiel (couple MN).
- ♦ C'est lors du paramétrage du logiciel de pilotage que l'on définit le type de mesure et selon quelle configuration on travaillera. Le système WENNER ou SCHLUMBERGER peut être utilisé, mais également toute autre configuration, pourvu que le paramétrage soit correctement fait.
- ♦ Ce type de mesure se fait de préférence en profil linéaire. On peut cependant réaliser plusieurs profils parallèles pendant une même session de mesures et avoir ainsi une image en 3 dimensions des variations de la résistivité d'une zone.
- ♦ La profondeur d'investigation dépend principalement de la configuration système utilisée et de l'écartement des électrodes. Avec une base de 64 électrodes espacés régulièrement tous les 5 m, soit une base de 315 m de longueur, on peut espérer atteindre 20 à 25 m de profondeur, en utilisant une configuration classique type WENNER. Avec un SCHLUMBERGER, on aura une trentaine de mètres et avec une configuration électrode à l'infini on peut espérer atteindre une cinquantaine de mètres de profondeur pour le même dispositif de 315 m de longueur.
- ♦ Le résultat est affiché sur l'écran d'ordinateur à la fin de la phase d'acquisition des mesures brutes pour ce qui concerne les résistivités apparentes. Le calcul d'une coupe demande un certain temps qui est fonction de la complexité, de la structure et du type d'ordinateur. Cette méthode déjà ancienne est devenue d'actualité par le fait des progrès techniques considérables des ordinateurs portables qui permettent aujourd'hui un traitement presque en temps réel et sur place.

MISE EN ŒUVRE, MATÉRIEL

- ♦ Une équipe comprend généralement deux personnes et un matériel léger permettant de qualifier la méthode de portable.
- ♦ L'équipement de base comprend :
 - un groupe d'appareils compacts qui permettent de faire plusieurs types de mesures comme l'intensité, le potentiel, et de compenser automatiquement la polarisation spontanée. En effet lorsque l'on plante dans le sol deux électrodes, un potentiel naturel apparaît entre ces deux points. Ce phénomène bien connu s'appelle la **polarisation spontanée** et dépend pour l'essentiel des interactions de l'eau et du sol par des effets électrolytiques et chimiques (cette propriété est d'ailleurs mesurée et utilisée pour certaines reconnaissances) ;
 - un ordinateur portable, au minimum un Pentium si l'on veut réaliser un traitement sur place.

Résistivités électriques (l'imagerie électrique) - Page3/4

♦ Le pilotage est fait sous le contrôle d'un logiciel spécifique. Les mesures sont faites au moins deux fois et plus si nécessaire.

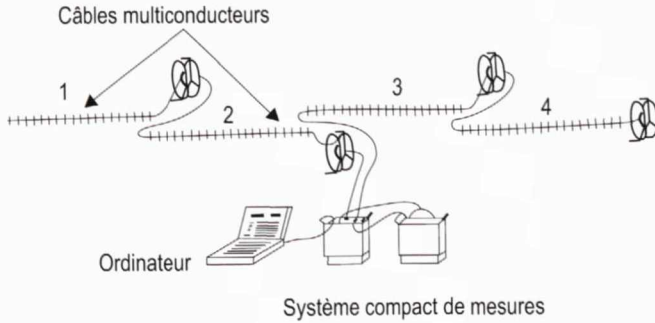


Figure n° 4 : Principe de mise en œuvre du système.

♦ On utilise un câble, ou plusieurs câbles multiconducteurs auxquels on relie un grand nombre d'électrodes implantées dans le sol avec un espacement régulier. Leur nombre peut varier de 32 à 64 voire 128. Le pas peut varier entre 1 et 10 m, selon le but recherché.

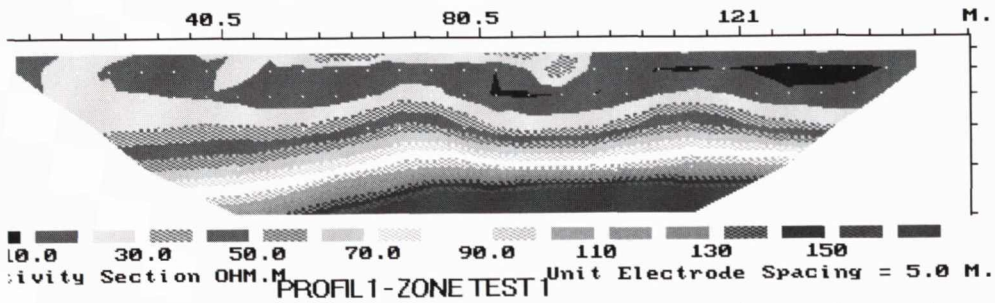


Figure n° 5 : Exemple d'un résultat d'imagerie électrique.

♦ Le rendement moyen : entre 2 et 4 dispositifs par jour (si base courte), ou jusqu'à 600-900 m/jour si on utilise un pas de 5 m avec 64 électrodes, avec implantation en temps masqué.

APPLICATION À L'AUSCULTATION DES DIGUES DE LA LOIRE

CONDITIONS FAVORABLES D'EMPLOI ET INTÉRÊT DU CHOIX

- ♦ Contraste des résistivités bien marqué entre les différents horizons.
- ♦ Recherche de la distribution des résistivités en profondeur, grande souplesse d'utilisation sur le terrain, la profondeur d'investigation qui concerne les digues (entre 8 et 12 m) est très facilement atteinte.

Résistivités électriques (l'imagerie électrique) - Page 4/4

♦ Méthode permettant d'avoir une « image » de la distribution des résistivités : c'est la raison de l'appellation de cette technique qui permet après modélisation de donner un aperçu assez parlant des hétérogénéités dans le sous-sol. Cette méthode est surtout intéressante par le fait du programme de modélisation performant qui y est associé et qui permet, entre autres, d'utiliser des paramètres de calage comme la profondeur ou la résistivité mesurée in situ, par exemple ou obtenue par d'autres techniques (sondage mécanique par exemple).

♦ Méthode à utiliser pour affiner une reconnaissance sur point particulier mais pas comme moyen généraliste.

LES CONTRE-INDICATIONS D'EMPLOI

♦ Pollutions électriques en milieu urbanisé : lignes à haute tension, courants vagabonds, phénomène de polarisation spontanée trop fort.

♦ Contraste des résistivités peu marqué.

♦ Structure trop complexe.

PRIX

Les prix sont donnés au kilomètre si les linéaires sont importants, sinon au profil. Ce prix est fonction du nombre d'électrodes et du pas adoptés pour faire le panneau.

Le prix moyen d'un panneau en imagerie électrique avec 64 électrodes varie entre 6 500 à 15 000 francs H.T. selon la difficulté de mise en place. La modélisation permettant de sortir une coupe « image » varie entre 1 000 et 1 500 francs H.T. par dispositif.

PRINCIPALES SOCIÉTÉS POUVANT RÉALISER CE TYPE DE PRESTATIONS

- C.E.B.T.P (Département géophysique de Clermont-Ferrand) ;
- CPGF-HORIZON ;
- E.D.G. ;
- GEO-ETUDES.

Reconnaissance des levées à sec
RECONNAISSANCES GÉOTECHNIQUES

Nom de la méthode : Pénétromètre dynamique léger

à enregistrement numérique (PANDA) - Page 1/2

DESCRIPTION ET PRINCIPE DE LA MÉTHODE

Le PANDA (Pénétromètre Autonome Numérique Dynamique Assisté par ordinateur) est un pénétromètre dynamique à énergie variable, fournie par le choc d'un marteau (actionné manuellement) sur une tête de battage solidaire d'un train de tiges équipé d'une pointe de pénétration. L'appareil enregistre automatiquement et à chaque coup, d'une part l'enfoncement du train de tiges, et d'autre part la vitesse de la tête de battage. Un calculateur intégré permet de déduire l'énergie de battage par la formule $E=1/2 MV^2$ et la résistance de pointe par la « formule des Hollandais » :

$$Q_d = \frac{1}{2} E \frac{M}{Ae (M + P)}$$

- V : vitesse mesurée de la tête de battage (cm/s)
- e : enfoncement plastique (cm)
- M : masse frappante en kg
- P : masse de la tête de battage et du train de tiges en kg
- A : section de la pointe en cm²
- Q_d : résistance dynamique de pointe en MPa

L'allure des pénétrogrammes et la résistance de pointe permettent de reconnaître la nature et la compacité des terrains traversés à condition d'avoir une bonne connaissance préalable de la structure des couches ou d'étalonner quelques essais pénétrométriques sur des forages carottés. Les variations relatives de résistance peuvent en outre mettre en évidence la présence de vides ou de zones décomprimées. La teneur en eau pouvant influencer sur la résistance de pointe, il est préférable d'utiliser cette méthode sur des digues à sec ou d'avoir par ailleurs connaissance du niveau piézométrique.

CARACTÉRISTIQUES ET CONDITION D'UTILISATION DE L'APPAREILLAGE

- ♦ Train de tiges de 0,5 m de longueur et 14 mm de diamètre.
- ♦ Pointes fixes de 2 cm² ou pointes perdues de 4 ou 10 cm².
- ♦ Boîtier électronique étanche (avec menus déroulants) permettant de saisir les données générales de l'essai et d'enregistrer les mesures de résistance et d'enfoncement.
- ♦ Poids total de la mallette contenant l'ensemble de l'appareil : 20 kg.
- ♦ Capacité de stockage : 4 000 mesures (soit une journée de mesures).
- ♦ Connexion possible avec micro-ordinateur PC pour transfert des données et visualisation des pénétrogrammes.
- ♦ Travail possible à un seul opérateur mais recommandation de travailler à deux pour meilleure sécurité et rapidité.

Pénétrromètre dynamique léger à enregistrement numérique (PANDA) - Page 2/2

CONDITIONS D'APPLICATION

- ♦ Sols fins et moyens. Ne convient pas pour les graves ; faux refus possible sur caillou isolé.
- ♦ Profondeur d'investigation jusqu'à 4-6 m en terrain moyennement compact (10-20 MPa).
- ♦ Rendement 20 à 50 m/jour selon la nature du terrain.
- ♦ Préférer les pointes débordantes (perdues) de façon à éviter le frottement latéral sur le train de tige ; la pointe de 4 cm² paraît un choix optimum.
- ♦ Prévoir un extracteur de tige.

COÛT (AVEC 2 OPÉRATEURS)

- Forfait d'installation par sondage : 100 à 200 F ;
- Prix de l'essai (y/c tracé des courbes) : 100 à 250 F/m (différenciation possible selon la résistance du terrain).

AVANTAGES

- ♦ Appareil léger, portable.
- ♦ Enregistrement numérique automatique des mesures.
- ♦ Bien adapté pour la reconnaissance qualitative des sols fins et moyens.
- ♦ Essai peu coûteux et rapide.

INCONVÉNIENTS

- ♦ Non adapté pour les graves et sols avec gros éléments isolés.
- ♦ Nécessité d'étalonnage par forages carottés pour interprétation quantitative des résultats.
- ♦ Profondeur d'investigation inférieure à 8-10 m.

APPLICATION AUX LEVÉES DE LA LOIRE

- ♦ Outil bien adapté pour une reconnaissance qualitative de la compacité des digues.
- ♦ Accès possible partout.
- ♦ Reconnaissance du niveau du substratum s'il est à faible profondeur.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DEPLAGNE F., BACCONNET C., ROYET P., 1993 - Intérêt du pénétromètre léger pour le contrôle du compactage des barrages en terre. *Journées Nationales d'Études « Petits Barrages »*, AFEID-CFGB - 2 et 3 février 1993, Bordeaux, pp. 265-278 ;
- GOURVES R. 1991 - *Le PANDA. Pénétrromètre dynamique léger à énergie variable pour la reconnaissance des sols*. Laboratoire de Génie Civil. CUST. Université Blaise Pascal, 12 p.

Reconnaissance des levées à sec
RECONNAISSANCES GÉOTECHNIQUES

Nom de la méthode : Essai in situ - Essai de perméabilité Lefranc - Page 1/2

PRINCIPE

L'essai Lefranc est l'essai le mieux adapté à la mesure des perméabilités in situ des levées de la Loire. Il consiste à injecter ou à pomper de l'eau dans une cavité de forme cylindrique appelée lanterne, ouverte dans le terrain (contenant une nappe) dont on veut connaître la perméabilité, et à mesurer les variations de charge et le débit correspondant.

Cet essai est pratiqué pendant l'exécution d'un sondage et la cavité est limitée par le fond et une partie de la paroi du sondage.

L'essai Lefranc donne une perméabilité locale autour de la lanterne : pour fixer les idées, perméabilité d'un volume sphérique de 50 cm de diamètre si l'essai est fait à partir d'un forage de 100 mm de diamètre.

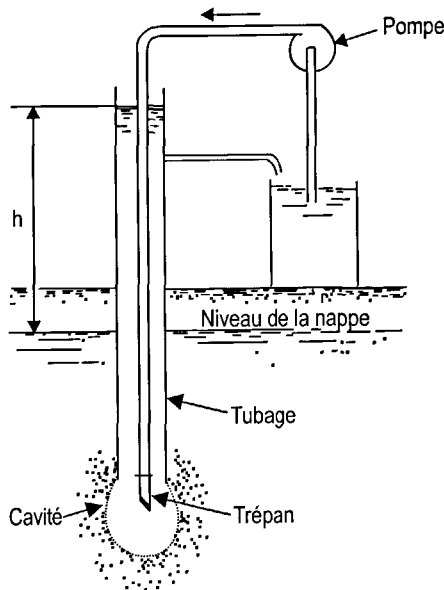


Figure 1 : Principe de la mesure.

MÉTHODES DISPONIBLES

On distingue deux types d'essais Lefranc :

- l'essai à **niveau constant** : on pompe ou on injecte de l'eau à débit constant dans la cavité jusqu'à stabilisation du niveau dans le forage. Ce type d'essai est réalisé dans les sols perméables ($k > 10^{-4}$ m/s). L'essai à niveau constant exige du matériel relativement important (citerne ou pompe et tuyauterie) ; il est simple à réaliser et facile à interpréter ;

Essai de perméabilité Lefranc - Page 2/2

- l'essai à niveau variable : on prélève ou on injecte (essai par abaissement ou par remontée) un volume d'eau donné dans la cavité. On suit en fonction du temps les variations de niveau dans le tube piézométrique. Cet essai est réalisé dans les sols peu perméables. L'essai à niveau variable demande peu de matériel (20 à 60 litres d'eau) ; il est très simple à réaliser ; mais l'interprétation est plus délicate. L'essai Lefranc est normalement réalisé dans un terrain saturé, sous nappe. Il est possible d'effectuer ce type d'essai en terrain non saturé mais la quantité d'eau nécessaire sera importante, car pendant une première partie de l'essai, il faudra saturer le terrain.

L'essai à niveau variable est le mieux adapté au cas des levées de la Loire, sous le niveau de la nappe. Au dessus de la nappe, ce qui paraît être le cas général des levées, on préférera l'essai à niveau constant de longue durée de façon à saturer un volume de terrain autour de la zone d'essai.

CONCLUSION

L'essai Lefranc est un essai réputé simple et peu coûteux. Toutefois, il doit être réalisé et interprété avec le plus grand soin par un personnel expérimenté, faute de quoi on risque de grossières erreurs de mesure.

Dans le cas de levées de la Loire, il est pénalisé par le fait que les levées sont généralement non saturées : une période de saturation du terrain est indispensable et l'essai doit être réalisé à niveau constant.

Reconnaissance des levées à sec
RECONNAISSANCES GÉOTECHNIQUES

Nom de la méthode : Perméafor - Page 1/2

DESCRIPTION ET PRINCIPE DE LA MÉTHODE

L'essai au Perméafor s'apparente à un essai Lefranc par injection (avec débit contrôlé et charge constante).

L'essai est réalisé au moyen d'un appareillage comprenant :

- ♦ un module de forage et d'essai d'eau, foncé dans le sol grâce à une machine de sondage classique travaillant en vibropercussion (ou battage) ;
- ♦ un module de commande et de mesure de débit ;
- ♦ un module d'acquisition et de traitement.

Le faible espacement entre les points de mesure permet d'obtenir une diagraphie de perméabilité horizontale. Les résultats sont présentés sous forme de rapport Q/H' (en m^2/s) :

Q : débit injecté [m^3/s]

H' : charge effective au niveau de la lanterne [m].

La durée très réduite de l'essai (10 s) ne permet pas d'obtenir un écoulement permanent dans les sols moyennement ou peu perméables. Dans ces conditions il n'est possible d'interpréter l'essai en valeurs de perméabilité, que pour les sols les plus perméables ($K > 10^{-3}$ m/s). En outre on mesure la vitesse d'avancée du forage, ce qui donne une indication qualitative de la compacité des matériaux traversés.

CARACTÉRISTIQUES ET CONDITIONS D'UTILISATION DE L'APPAREILLAGE

- ♦ Module Perméafor de dimensions 0,72 m x 1,05 m x 1,80 m installé dans un véhicule utilitaire + matériel de forage.
- ♦ Essai réalisé au fur et à mesure du fonçage.
- ♦ Crépine de mesure cylindrique de 5 cm de hauteur et 6 cm de diamètre, soit une hauteur de forage intéressée de 10 cm. Parties renflées de part et d'autre de la crépine, jouant le rôle d'obturateurs.
- ♦ Possibilité d'effectuer jusqu'à 5 à 10 mesures par mètre de forage (classiquement 5).
- ♦ Temps de mesure de 10 s dans l'essai standard.
- ♦ Écoulement quasi-horizontal dans le sol environnant la crépine.
- ♦ Calcul permanent des pertes de charge dans l'appareillage, permettant de prendre en compte la pression effective de l'écoulement au niveau de la crépine.
- ♦ Interprétation immédiate sur le chantier.
- ♦ Réalisation par deux opérateurs (un pour la foreuse, un pour le Perméafor).

CONDITIONS D'APPLICATION

- ♦ Sols moyennement à fortement perméables (gamme de perméabilité de 10^{-5} à $5 \cdot 10^{-3}$ m/s). Ne convient pas pour des interprétations quantitatives dans les sols peu perméables.
- ♦ Profondeur d'investigation limitée uniquement par les performances du matériel de forage (classiquement 20 à 30 m).

Perméafor - Page 2/2

♦ Rendement : 30 à 60 m/jour avec la procédure classique (un essai de 10 s tous les 20 cm) selon temps de transfert d'un forage à l'autre.

Coût

- matériel de forage : 8 000 à 10 000 F/jour ;
- ensemble Perméafor : 6 500 F/jour.

AVANTAGES

- ♦ Rapidité et facilité de mise en œuvre avec des moyens classiques de forage.
- ♦ Mesure de perméabilité horizontale en quasi-continu le long du forage.
- ♦ Indication complémentaire de la compacité du sol puisque l'on dispose d'un enregistrement de la vitesse du fonçage.
- ♦ Possibilité de réaliser en fin d'essai un profil de forage à l'aide d'une sonde gamma pour identifier les couches imperméables.

INCONVÉNIENTS

- ♦ Nécessité d'accès au site par véhicule utilitaire.
- ♦ Ne convient pas aux sols peu perméables.
- ♦ Nécessité d'associer des essais classiques pour interpréter quantitativement les résultats.
- ♦ Un seul prestataire pour le Perméafor (LRPC de Strasbourg).

APPLICATION AUX LEVÉES DE LA LOIRE

- Appareil intéressant pour disposer de profils de perméabilité au travers des digues, en particulier dans les zones perméables ;
- Coût et rendement intéressants.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- URSAT P., 1992 - Le Perméafor. Appareillage de diagraphie de perméabilité. *Bulletin de liaison P et Ch* ;178 mars-avril 1992, pp. 19-26 - Réf. 3641 ;
- URSAT P. 1985 - Le Perméafor, un appareil bien adapté à l'analyse des fuites dans les digues en terre, 11^e Conférence Européenne de Méca-Sols et Travaux de Fondation, 28 mai - 1er juin 1995, Copenhague.

Reconnaissance des levées à sec
RECONNAISSANCES GÉOTECHNIQUES

Nom de la méthode : Phicomètre - Page 1/2

PRINCIPE DE LA MÉTHODE

Le phicomètre est un appareil destiné à mesurer directement dans un forage la résistance au cisaillement des sols. Il présente l'avantage de pouvoir déterminer les caractéristiques mécaniques des sols en s'affranchissant de la nécessité du prélèvement d'échantillons intacts souvent impossible pour certains sols (sols hétérogènes ou grossiers).

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

La contrainte s , normale à la paroi du forage, est maintenue constante à l'aide d'une cellule gonflable.

Un effort de traction T est exercé sur le train de tiges jusqu'à rupture du sol par cisaillement le long de la surface cylindrique S .

On obtient ainsi la contrainte de cisaillement à la rupture.

En répétant l'essai pour des valeurs croissantes de s , on obtient plusieurs points représentatifs dans le plan de Mohr et on peut ainsi tracer la droite intrinsèque et évaluer j_1 et C_1 (angle de frottement et cohésion résiduels à court terme).

Essai en cours de normalisation : NF X P - P 94 - 120 (projet)

CARACTÉRISTIQUES ET CONDITIONS D'UTILISATION DE L'APPAREILLAGE

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

CONDITIONS D'APPLICATION

- ♦ Les essais sont réalisés au fur et à mesure de l'avancement du forage par alternance des phases de forage puis d'essai.
- ♦ Veiller à la qualité du forage - techniques identiques à celles du pressiomètre (voir recommandations en annexe de la norme NFP 94-110).
- ♦ Étalonnage pour déterminer la surface de cisaillement en fonction du volume de la sonde.

Phicomètre - Page 2/2

- ♦ 5 à 8 paliers successifs de cisaillement à s constant ; arrachement à vitesse constante de 2 mm/mn jusqu'à un déplacement maximal de 7 mm par palier.
- ♦ Gamme des valeurs de contrainte normale à déterminer en fonction de la valeur (mesurée ou estimée) de P_1 (pression limite à l'essai pressiométrique).
- ♦ Sols mous ($P_1 < 0,3$ à $0,5$ MPa) pratiquement en dehors du champ d'application du phicomètre.
- ♦ Durée complète d'un essai : environ une heure.
- ♦ Rendement : 4 essais environ par jour y compris le forage.

Coût

Coût du forage :

- selon nature des terrains ;
- intégrer coût d'immobilisation pendant la réalisation de l'essai.

Coût de l'essai : 1 000 à 1 500 francs/U (couple de valeurs C_v, j_i).

AVANTAGES

- ♦ Seul essai permettant la mesure in-situ des caractéristiques mécaniques des sols (c, j), y compris dans certains sols imprélevables pour essais labos sur échantillons intacts (graves, alluvions sous nappe, argile à silex ...).
- ♦ Plusieurs sociétés de géotechnique sont équipées de cet appareil.

INCONVÉNIENTS

- ♦ Nécessité d'un forage d'excellente qualité sans tubage (difficile dans sols très hétérogènes).
- ♦ Essai non adapté aux sols mous.

APPLICATION AUX LEVÉES DE LA LOIRE

- ♦ Pas de référence à ce jour.
- ♦ Nécessité de vérifier la compacité des sols et la tenue des forages.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

PHILIPPONAT G. 1986 - Le Phicomètre : essai de cisaillement rectiligne in-situ. *Revue Française de géotechnique* n° 35.

PHILIPPONAT G. 1987 - Le Phicomètre - Analyse de 200 essais de cisaillement in-situ. *Annales de l'I.T.B.T.P.* n° 460 - Décembre 1987, pp. 65-87.

PHILIPPONAT G., ZERHOUNI M. 1993 - Interprétation de l'essai au phicomètre - *Revue Française de géotechnique*, n° 65, pp. 3-28.

Reconnaissance des levées à sec *RECONNAISSANCES GÉOTECHNIQUES*

Nom de la méthode : Forages mécaniques - Page 1/4

OBJECTIFS GÉNÉRAUX

Les forages mécaniques s'inscrivent dans le cadre du programme-type de reconnaissances recommandé avec, sur un profil en travers tous les 2 km en moyenne :

- ♦ un sondage carotté en crête de digue, côté val ;
- ♦ un sondage destructif en bas de talus côté val ;

poursuivis en fondation et équipés d'un piézomètre.

Le sondage carotté est une méthode de foration, qualifiée de non destructive, qui consiste à foncer dans le sol, à l'aide d'une foreuse, un carottier fixé au bout d'un train de tige et permettant le prélèvement, puis le retour en surface, d'échantillons intacts (carottes) pour les essais de laboratoire.

Par opposition au précédent, le sondage destructif met en œuvre des outils désagrégateurs qui débitent ou délitent le terrain en fragments (cuttings) ou copeaux pouvant être ramenés à la surface soit par un fluide de circulation (sondage au tricône ou au marteau fond de trou), soit par une trousse hélicoïdale (sondage à la tarière). L'enregistrement des paramètres de foration (diagraphie) facilite ou complète l'interprétation géologique de ce type de sondage.

Par rapport à la prospection géophysique, la reconnaissance par forages est plus onéreuse mais apporte une définition précise, bien que ponctuelle, de la structure du sous-sol : à ce titre, des forages restent toujours nécessaires pour étalonner les méthodes géophysiques. En outre, ils peuvent servir de base à la réalisation d'essais in situ (ex : essai Lefranc, phicomètre) et à la pose d'instruments d'auscultation (ex : piézomètre, inclinomètre, etc.).

MÉTHODES DISPONIBLES ET CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE

a) Sondages carottés (norme P 94-202)

Il s'agit de la technique de foration la plus lourde, donc la plus chère, mais aussi de celle susceptible d'apporter les informations les plus précises sur les caractéristiques du sol, en particulier sur ses propriétés mécaniques en place, grâce à la possibilité de prélèvement d'échantillons non remaniés (qui constitue le principal intérêt de la méthode dans le cas des levées de la Loire et dont les modalités font l'objet de la norme suscitée).

Aussi, le carottier est choisi, suivant la nature et la consistance (prévisibles) du terrain, de façon à permettre le prélèvement d'échantillons intacts de classe 1, au sens de la norme P 94-202, pour identification complète et détermination des propriétés mécaniques en laboratoire de mécanique des sols. Le diamètre des carottes est compris entre 75 et 110 mm.

Forages mécaniques - Page 2/4

Pour les sols fins à dominante sableuse, le choix de l'outil de prélèvement se limite a priori aux carottiers de type poinçonneur (notamment à piston stationnaire). Pour les sols très sableux, le prélèvement d'échantillons de classe 1 peut se révéler impossible. Les carottiers rotatifs sont utilisés pour la reconnaissance des roches (ex : substratum calcaire) ou des sols fins raides.

Les forages doivent être exécutés par une entreprise compétente et expérimentée, si possible en la présence d'un spécialiste en géotechnique. Le foreur consigne, par sondage, dans un calepin tenu à cet effet, ses observations, les références des prélèvements ainsi que tous les incidents d'exécution (pertes d'eau, chutes d'outil, etc.).

Les carottes sont soigneusement repérées (profondeur), placées dans des caisses en bois, décrites et photographiées par le géotechnicien. Les caisses sont ensuite étiquetées, transportées et stockées dans un local approprié. Ces descriptions ainsi que les informations issues du calepin de chantier seront, par la suite, exploitées pour l'établissement des logs de sondage.

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

b) Sondages destructifs

Les forages destructifs peuvent être effectués :

- ♦ à la tarière mécanique, où l'outil de prélèvement est constitué d'une trousse coupante hélicoïdale de 100 à 300 mm de diamètre ;

- ♦ au marteau fond de trou ou au tricône (diamètre de l'ordre de 100 mm), avec fonçage de l'outil par percussion ou rotoperçusion et injection d'un fluide de circulation.

Les premiers sont adaptés aux terrains meubles et peu cohérents, les seconds aux terrains cohérents ou rocheux.

Le sondage à la tarière permet une description facile et assez fine de la structure du sol grâce à l'examen attentif des prélèvements de sol, successivement rapportés par l'outil. En outre, la tarière autorise, si le terrain s'y prête, le prélèvement d'échantillons remaniés de classe 3 (au sens de la norme P94-202) en vue des essais d'identification (granulométrie, limites d'Atterberg, teneur en eau,...).

L'interprétation géologique des sondages par percussion ou rotoperçusion est plus délicate puisque ne se basant que sur l'étude des quelques cuttings remontés, de façon plus ou moins différée et irrégulière, par le fluide de circulation. Aussi, les sondages destructifs sont maintenant presque systématiquement accompagnés (et pour un surcoût modique) d'un enregistrement simultané (graphique ou numérique) de leurs paramètres de foration, tels que la vitesse d'avancement de l'outil, la valeur du couple, la

Forages mécaniques - Page 3/4

vitesse de rotation, la poussée sur l'outil et/ou la pression du fluide de circulation. L'étalonnage sur au moins un forage carotté, recoupant tout ou partie de la coupe de terrain, permet d'établir une interprétation réaliste des diagraphies enregistrées à partir de sondages destructifs.

Comme pour les sondages carottés, la compétence et l'expérience du foreur sont les gages de réussite des sondages destructifs : la tenue soignée du calepin de forage est un moyen de garantir et de suivre la qualité des opérations. La présence sur le chantier d'un géotechnicien est recommandable (examen et description des cuttings ou des échantillons remaniés) tout comme son implication dans l'interprétation des diagraphies et l'élaboration des logs de sondage.

Équipement des sondages

L'équipement des sondages avec un piézomètre à tube ouvert permet d'exploiter le trou de forage réalisé, avec un coût d'installation très raisonnable, par un dispositif d'auscultation simple qui permettra de suivre ultérieurement l'évolution du niveau piézométrique dans la fondation ou le corps de la levée (en période de crue). Selon la consistance du sol, l'installation du tube nécessite la pose d'un tubage provisoire sur tout ou partie de la hauteur du forage. Les tubes piézométriques sont généralement en PVC, de diamètre intérieur compris entre 20 et 30 mm, et fermés à l'aide d'un bouchon étanche (pour empêcher la contamination par les eaux de pluie). Les caractéristiques de crépinage du tube (totalité du tube ou, plus fréquemment, derniers mètres inférieurs) doivent être précisées sur la fiche de suivi du sondage. Les têtes de tube doivent être scellées par un petit massif en béton et levées en X, Y et Z (nivellement NGF), par rapport à un point de référence connu, afin d'être positionnées sur le plan topographique disponible. Chaque tête est équipée d'un boîtier de protection cadenassé afin d'éviter les actes de vandalisme (obstruction par des objets jetés dans le tube).

La pose d'un tube inclinométrique est plus délicate et ne se révèle intéressante que pour les sondages effectués en secteur de glissement du talus déclaré ou potentiel. A la différence du suivi piézométrique, l'auscultation inclinométrique présente un coût assez élevé. Les mesures inclinométriques nécessitent, en effet, un appareillage sophistiqué (torpille munie d'accéléromètres, avec câblage et boîtier d'acquisition) et sont d'interprétation délicate : leur réalisation doit donc être confiée à un bureau spécialisé, équipé du matériel et des logiciels adéquats.

COÛT (POUR DES PROFONDEURS COMPRISES ENTRE 10 ET 15 M)

a) Sondages carottés

1 200 F à 1 500 HT / m, y compris mise en station par sondage, prélèvement /conditionnement des échantillons intacts et établissement des logs (non compris le forfait d'aménée-repli de la foreuse sur le chantier).

b) Sondages destructifs

350 à 450 F HT / m pour le tricône, 400 à 500 F HT / m pour la tarière, avec enregistrement continu des paramètres de foration, y compris mise en station par sondage, interprétation des diagraphies et établissement des logs (non compris le forfait d'aménée-repli de la foreuse sur le chantier).

Forages mécaniques - Page 4/4

c) Équipement des sondages

- ♦ piézomètre (PVC) : 100 à 150 F HT / m, y compris assemblage et pose du tube ainsi que dispositif de scellement et de protection de la tête ;
- ♦ inclinomètre (aluminium) : 250 à 350 F HT / m, y compris assemblage et scellement du tube ainsi que dispositif de scellement et de protection de la tête ;
- ♦ tubage provisoire du forage : 100 à 150 F HT / m.

AVANTAGES

- ♦ information précise sur la structure du sous-sol (en particulier, indispensable ponctuellement pour l'étalonnage des méthodes géophysiques) ;
- ♦ possibilité d'équiper le sondage avec un instrument d'auscultation (piézomètre ou inclinomètre) ;
- ♦ sondage carotté : prélèvement d'échantillons intacts pour analyse en laboratoire de mécanique des sols (caractéristiques mécaniques en place).

INCONVÉNIENTS

- ♦ coût relativement élevé, pour une information ponctuelle ;
- ♦ nécessité d'un accès et d'une emprise suffisante au sol pour l'amenée et l'installation de la foreuse ;
- ♦ sondage carotté : représentativité relative du (ou des) échantillon(s) prélevé(s), par rapport à l'ensemble de la levée.

APPLICATION AUX LEVÉES DE LA LOIRE

L'application aux levées de la Loire des méthodes de foration ne pose pas de problème particulier d'exécution pour les sondages en crête de digue, dans la mesure où l'accès y est généralement facile (la mise en place d'une restriction ou d'une déviation de la circulation sur la route de crête peut cependant s'avérer indispensable à la bonne conduite et à la sécurité du chantier). Par contre, la réalisation des forages en bas de talus côté val peut se révéler difficile, voire impossible, par enclavement ou manque d'emprise, lorsque des bâtiments sont intégrés dans le corps de la levée ou sont situés à proximité de son pied.

Pour les sondages carottés, la présence de terrains à dominante sableuse (matériau non cohérent) risque d'empêcher ou de rendre aléatoire le prélèvement d'échantillons intacts (classe 1 de la norme P 94-202).

Pour les sondages destructifs, la technique a priori la plus adaptée (et la plus utilisée) est la tarière du fait de la nature sableuse des matériaux.

FICHES ASSOCIÉES

Essais de laboratoire
Essai de perméabilité Lefranc
Phicomètre

Reconnaissance des levées à sec
RECONNAISSANCES GÉOTECHNIQUES

Nom de la méthode : **Essais de laboratoire - Page 1/8**

OBJECTIFS GÉNÉRAUX

Les essais de laboratoire s'inscrivent dans le cadre du programme-type de reconnaissances recommandé pour lequel un sondage carotté tous les 2 km est prévu. Les essais de laboratoire peuvent également être réalisés lors de reconnaissances approfondies sur des points ou tronçons singuliers.

Des échantillons intacts sont à prélever dans ces sondages en vue de réaliser des essais de laboratoire visant à une meilleure caractérisation des matériaux constitutifs des digues et de la fondation. Le prélèvement d'échantillons intacts de matériaux sableux peu denses est une opération délicate, en particulier si elle est effectuée sous nappe, ce qui peut être le cas dans la partie basse des digues et dans la fondation.

D'autres modes de prélèvement sont envisageables : sondage à la tarière pour le prélèvement d'échantillons en vue d'identification, prélèvement à la trousse coupante dans une excavation réalisée dans la digue en vue d'essais mécaniques.

On distingue :

- ♦ les essais d'identification sur échantillons remaniés ;
- ♦ les essais d'identification sur échantillons intacts ;
- ♦ les essais mécaniques sur échantillons intacts.

MÉTHODES DISPONIBLES

ESSAIS D'IDENTIFICATION SUR ÉCHANTILLONS REMANIÉS

Les principaux essais d'identification sont effectués sur échantillons remaniés. Les essais à prévoir de façon systématique dans le cas des digues de la Loire sont les suivants :

analyse granulométrique par tamisage (norme NFP 94-056)

Pour les sols sableux, on utilise une série normalisée de tamis pour déterminer la répartition en poids des grains suivant leur dimension.

Les résultats sont traduits sous forme d'une *courbe granulométrique* obtenue en représentant, en fonction de la dimension D d'un grain, le pourcentage en poids de grains de dimension inférieure à D.

teneur en eau (norme NFP 94-050)

La teneur en eau se détermine par deux pesées, une avant et une après passage à l'étuve à 105°.

La teneur en eau naturelle varie suivant la saison et la position de la nappe ; le rapport d'essai devra préciser ces éléments.

Essais de laboratoire - Page 2/8

Dans le cas où une fraction argileuse significative serait présente dans les remblais, on prévoira, en complément, les essais suivants :

analyse sédimentométrique (norme NFP 94-057) :

Cet essai complète l'analyse granulométrique si le matériau contient, à vue ou au toucher, une fraction argileuse significative, ce qui n'est pas le cas général des levées de la Loire.

L'analyse sédimentométrique est fondée sur la formule de Stokes donnant la vitesse limite d'une particule tombant sous son propre poids dans un liquide visqueux. Après avoir dispersé par agitation les particules de sol dans l'eau, on obtient une solution homogène que l'on laisse décanter. On mesure la variation de densité de la solution, à divers niveaux, en fonction du temps, avec un hydromètre.

L'essai au bleu de méthylène (norme NFP 94-068) permet de vérifier l'activité (capacité gonflante) de cette fraction argileuse.

limites d'Atterberg (norme NFP 94-051) :

Dans le cas des sols fins (plus de 50% d'éléments inférieurs à 80μ) où la surface spécifique des grains est grande, l'eau joue un rôle très important dans le comportement du sol. Les limites d'Atterberg caractérisent les différents états d'un sol fin selon sa teneur en eau. En général, elles sont mesurées sur le sol écrété à 0,4 mm (module AFNOR n° 28). On définit :

- la limite de liquidité w_l qui sépare l'état plastique de l'état liquide ;
- la limite de plasticité w_p qui sépare l'état plastique de l'état solide ;
- l'indice de plasticité $IP = w_l - w_p$.

Connaissant la teneur en eau en place w , les limites :

- donnent une idée de la consistance à travers l'indice de consistance $I_c = (w - w_p) / IP$,
- participent à la classification des sols fins (diagramme de Casagrande),
- permettent d'estimer l'angle de frottement interne ϕ par corrélation avec l'indice de plasticité IP .

ESSAIS D'IDENTIFICATION SUR ÉCHANTILLONS INTACTS

pooids volumique sec γ_d (norme NFP 94-053)

Ce paramètre est important car il caractérise la compacité du sol. La perméabilité et la résistance au cisaillement, pour un sol donné, sont bien corrélées à γ_d .

essai Proctor standard (norme NFP 94-093)

L'essai Proctor standard sert à déterminer les caractéristiques de compactage d'un sol. Pour un remblai existant, il permet de comparer la densité en place à la densité correspondant à l'optimum Proctor

Essais de laboratoire - Page 3/8

standard et donc d'estimer le taux de compactage du remblai. Cet essai est particulièrement intéressant pour les levées de la Loire qui souffrent, de façon systématique, d'un défaut de compactage.

La réalisation d'un essai Proctor pour un sol fin nécessite le prélèvement d'une quinzaine de kilogrammes de matériaux remaniés (tarière ou fouille).

CLASSIFICATION DES SOLS

Les essais d'identification permettent de décrire les matériaux constitutifs des digues à travers une classification des sols. L'utilisation de la classification LCPC est recommandée. Elle distingue :

les sols fins (plus de 50% d'éléments inférieurs à 80 μ) :

on utilise l'abaque de Casagrande ($w_p - IP$).

La séparation entre limons (encore appelés silts) et argiles, est faite statistiquement par la ligne A, d'équation $IP = 0,73 (w_p - 20)$. La verticale correspondant à la limite de liquidité w_l égale à 50% sépare les argiles (ou limons) peu plastiques des argiles (ou limons) très plastiques.

les sols grenus :

les classes granulométriques utilisées en France ont été définies par Atterberg en 1905. Les «diamètres» caractéristiques sont les suivants :

- caillou $d > 20$ mm
- gravier 2 mm $< d < 20$ mm
- gros sable $0,2$ mm $< d < 2$ mm
- sable fin $0,02$ mm $< d < 0,2$ mm
- limon $0,002$ mm $< d < 0,02$ mm
- argile $d < 0,002$ mm

La classification L.C.P.C., adoptée en France en 1965 (fortement inspirée de la classification américaine l'Unified Soil Classification System) est essentiellement fondée sur des critères granulométriques.

L'abaque de Casagrande et la classification L.C.P.C. des sols grenus sont annexés à la présente fiche.

PERMÉABILITÉ

La perméabilité est un paramètre fondamental du comportement des digues en crue. La détermination de la perméabilité au laboratoire n'est pas très aisée et généralement on lui préfère les essais d'eau in situ, essai Lefranc en particulier.

On rappelle que pour des matériaux sableux, on a une estimation satisfaisante de la perméabilité k (exprimée en m/s) à partir de la granulométrie par la formule de Hazen : $k = d_{10}^2$

où d_{10} est le diamètre, exprimé en cm, du tamis laissant passer 10% du poids du matériau.

Essais de laboratoire - Page 4/8

La perméabilité peut être déterminée au laboratoire par un essai au perméamètre. Cet essai consiste à faire percoler de l'eau à travers une éprouvette de sol sous charge contrôlée.

Deux procédures sont possibles :

essai sous charge constante (non normalisé : procédure LCPC):

on assure un écoulement permanent sous charge constante entre deux réservoirs en ajustant le débit d'alimentation ;

essai sous charge variable (non normalisé : procédure LCPC):

on maintient le niveau du réservoir inférieur constant et on mesure la baisse du niveau dans le réservoir supérieur en fonction du temps. C'est un essai en régime non permanent. Il est d'une utilisation plus fréquente que le précédent et peut s'adapter sur un moule œdométrique. De plus, le volume du moule (moule CBR = 2,74 dm³) est assez important et se prête difficilement aux essais sur échantillons intacts.

La difficulté des essais de perméabilité au perméamètre, en particulier pour les sols fins, est l'effet de bord au contact des parois du cylindre, qui constituent une singularité de l'écoulement.

RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT

Le paramètre mécanique le plus significatif est la résistance au cisaillement du sol, caractérisée par sa cohésion et son angle de frottement interne. Deux types d'essai permettent de la déterminer :

l'essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande (norme 94-071/1)

Il s'agit d'un essai de cisaillement direct d'un échantillon soumis à une compression axiale dans une boîte de cisaillement.

Cet essai doit être effectué avec des vitesses de cisaillement suffisamment lentes pour permettre la dissipation des pressions interstitielles. Il est peu coûteux mais également peu précis. Il ne convient pas aux sols fins.

Il permet la détermination de la courbe intrinsèque $\tau = f(\sigma)$ et par conséquent les caractéristiques intrinsèques Φ' et c' pour un sol grenu.

l'essai triaxial (norme NFP 94-074)

L'essai de compression triaxiale est également un essai permettant de déterminer la courbe intrinsèque du sol.

L'appareil triaxial permet d'appliquer sur un échantillon cylindrique de sol contenu latéralement dans une fine membrane, d'une part une pression latérale p par l'intermédiaire d'un fluide comprimé, d'autre part une force axiale F par l'intermédiaire d'un piston.

Essais de laboratoire - Page 5/8

Aux extrémités de l'échantillon sont placées des pierres poreuses rigides qui sont reliées à un système permettant de mesurer la pression interstitielle u de l'eau dans le cas des sols saturés et d'effectuer ou non un drainage de l'échantillon.

L'essai comporte deux phases : application d'une contrainte isotrope sur l'échantillon puis application d'un déviateur de contrainte, jusqu'à la rupture de l'échantillon.

Selon les conditions de l'essai, on distingue :

L'essai UU (non consolidé, non drainé)

L'application des contraintes, à drainage fermé, ne vise ici qu'à corriger les phénomènes dus à la décompression du matériau. La phase de cisaillement, sans dissipation des pressions interstitielles, correspond au comportement à court terme du sol.

La caractéristique ainsi déterminée est la cohésion non drainée notée c_u . Elle peut être utilisée dans un calcul de stabilité en contrainte totale et est représentative du comportement à court terme.

Cet essai est rapide et donc peu coûteux. Il ne permet pas de déterminer les caractéristiques effectives du matériau (c' et Φ).

L'essai CU (consolidé non drainé)

Pendant la première phase, à drainage ouvert, les contraintes isotropes sont maintenues suffisamment longtemps pour permettre la dissipation totale des surpressions interstitielles et la saturation du sol. Cette consolidation est effectuée sous contre-pression ; cette phase peut durer plusieurs semaines. On obtient ainsi des éprouvettes consolidées à pression effective p connue. La phase de cisaillement se déroule à drainage fermé, avec mesure de la pression interstitielle.

Cet essai permet de déterminer les variations de la cohésion non drainée c_u en fonction de la pression de consolidation (c_{cu} et Φ_{cu})

Si on a mesuré les pressions interstitielles pendant la phase de cisaillement, il permet de déterminer les caractéristiques de cisaillement intrinsèques c' et Φ .

La vitesse de cisaillement doit être assez lente (10 à 30 μ /minute selon les sols) pour permettre l'égalisation de la pression interstitielle mesurée à la peau.

L'essai CD (consolidé drainé)

La phase de consolidation est la même que dans l'essai CU.

La phase de cisaillement, effectuée à drainage ouvert, est suffisamment lente pour permettre la dissipation des surpressions interstitielles à mesure qu'elles apparaissent avec les variations de contraintes : 1 à 2 μ /minute pour les matériaux argileux, 10 à 30 μ /minute pour les matériaux sableux.

Essais de laboratoire - Page 6/8

L'essai CD donne les caractéristiques effectives du sol, c' et ϕ' , qui interviennent dans les calculs de stabilité en contraintes effectives.

Compte tenu du caractère sableux du matériau des levées, l'essai CD est recommandé. L'essai CU sera réalisé si le matériau est plus argileux car il est alors plus économique.

LOI DE COMPORTEMENT DU SOL

Les lois de comportement des sols constituent un domaine vaste et complexe. Elles se caractérisent par leur forte non linéarité et, dans le cas des sols fins, par l'influence prépondérante de l'eau interstitielle. Les caractéristiques contraintes - déformations dépendent du chemin de contrainte suivi. Elles sont déterminées à l'appareil triaxial décrit précédemment, qui permet de simuler des chemins de contrainte variés et à l'œdomètre.

L'œdomètre est généralement utilisé pour les sols fins. Il permet de déterminer les caractéristiques de déformabilité et de consolidation du matériau.

L'essai œdométrique (norme NFP 94-090/1) consiste à mesurer les déformations à charge constante d'une éprouvette cylindrique avec déformation latérale nulle et drainage sur les faces inférieures et supérieures.

L'échantillon placé entre deux pierres poreuses, assurant un drainage constant, est soumis, par l'intermédiaire d'un piston, à des pressions successives croissantes puis décroissantes ; l'enfoncement du piston est mesuré à l'aide d'un comparateur.

La réalisation d'essais œdométriques pour les levées sableuses de la Loire est, de façon générale, de peu d'intérêt. Par contre, le moule œdométrique pourra être utilisé pour la réalisation des essais de perméabilité (essai non normalisé).

ÉLÉMENTS DE COÛT

- analyse granulométrique 400 F (HT)
- analyse sédimentométrique 500 F (HT)
- teneur en eau naturelle 85 F (HT)
- limites d'Atterberg (5 points) 620 F (HT)
- poids volumique sec 200 F (HT)
- essais Proctor Standard (5 points) 1 900 F (HT)
- essai de cisaillement à la petite boîte de Casagrande (3 ruptures) : / lent 2 500 F (HT) / rapide 1 600 F (HT)
- essai triaxial UU (3 écrasements) 800 F (HT)
- essai triaxial CU (3 écrasements) 4 000 F (HT)
- essai triaxial CD avec contre pression (3 écrasements) 5 200 F (HT)
- perméabilité (à charge constante) 600 F (HT)
- perméabilité (à charge variable) 600 F (HT)
- compressibilité et perméabilité à l'œdomètre (10 paliers) 2 000 F (HT)

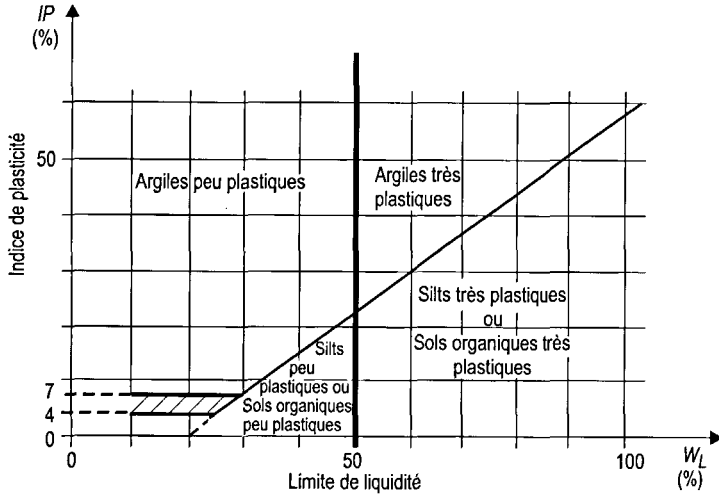
Essais de laboratoire - Page 7/8

On note que la caractérisation complète au laboratoire, y compris le prélèvement d'échantillons, coûte cher, d'autant plus que les essais de laboratoire ne fournissent que des informations ponctuelles. Il n'est donc pas recommandé de multiplier les prélèvements.

CLASSIFICATION DES SOLS GRENUS (plus de 50% d'éléments > 0,08 mm)						
Définitions		Symboles	Conditions	Appellations		
GRAVES	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm	moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	Gb (GW)	$\frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ et $\frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	Grave propre bien graduée	
			Gm (GP)	Une des conditions de Gb non satisfaite	Grave propre mal graduée	
		plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	GL (GM)	Limite d'Atterberg au-dessous de A	Grave limoneuse	
			GA (GC)	Limite d'Atterberg au-dessus de A	Grave argileuse	
			moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	Sb (SW)	$\frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $\frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	Sable propre bien gradué
				Sm (SP)	Une des conditions de Sb non satisfaite	Sable propre mal gradué
plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	SL (SM)	Limite d'Atterberg au-dessous de A		Sable limoneux		
	SA (SC)	Limite d'Atterberg au-dessus de A	Sable argileux			
	Lorsque 5% < % inférieur à 0,08 < 12% → on utilise un double symbole					

Sols grenus : classification L.C.P.C.

Essais de laboratoire - page 8/8



Sols fins : abaque de Casagrande

Chapitre 7

**Cahier
des clauses techniques particulières
(C.C.T.P.)**

MARCHÉ PUBLIC DE
PRESTATIONS INTELLECTUELLES

**Cahier des clauses techniques particulières
(C.C.T.P.)**

MAÎTRE D'OUVRAGE

[...]

MAÎTRE D'ŒUVRE

[...]

OBJET DU MARCHÉ

Étude de diagnostic hydraulique et géotechnique approfondi de la levée de Loire, dite de [...] PK[...] au PK[...]

- Sommaire -

CHAPITRE I : CONTEXTE ET OBJET DE L'ÉTUDE DISPOSITIONS GÉNÉRALES

ARTICLE I.1 - OBJET DU CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIÈRES (C.C.T.P.)

ARTICLE I.2 - CONTEXTE ET JUSTIFICATION DE L'ÉTUDE

1.2.1 - Présentation rapide du secteur de levée

1.2.2 - Spécificités et enjeux de l'étude

ARTICLE I.3 - OBJECTIFS ET CANEVAS GÉNÉRAL DE L'ÉTUDE

1.3.1 - Objectifs

1.3.2 - Canevas général de l'étude

ARTICLE I.4 - DISPOSITIONS GÉNÉRALES

1.4.1 - Crue de référence

1.4.2 - Référence pour le repérage kilométrique

CHAPITRE II : CONSISTANCE, MODALITÉS D'EXÉCUTION ET DE RESTITUTION DE L'ÉTUDE

ARTICLE II.1 - DOCUMENTS EXISTANTS ET ÉTUDES ANTÉRIEURES

ARTICLE II.2 - PROGRAMME ET MOYENS D'EXÉCUTION DE L'ÉTUDE

II.2.1 - Établissement du programme d'exécution de l'étude

II.2.2 - Contraintes concernant l'ordre d'enchaînement des phases d'étude

II.2.3 - Personnels et moyens d'exécution

ARTICLE II.3 - CONSISTANCE, SPÉCIFICATIONS GLOBALES ET MODALITÉS D'EXÉCUTION DES PHASES SUCCESSIVES D'ÉTUDE

II.3.1 - Étude historique : étapes de construction de la levée, grandes crues, ruptures et désordres

II.3.1.1 - Justification et objectif

II.3.1.2 - Contenu de la phase d'étude

II.3.2 - Étude morphodynamique du lit

II.3.2.1 - Justification et objectif

II.3.2.2 - Contenu de la phase d'étude

II.3.3 - Levé topographique

II.3.3.1 - Objectif global et dispositions générales

II.3.3.2 - Établissement des profils en long de la levée par rapport aux plus hautes eaux en crues

II.3.3.3 - Établissement des profils en travers de la levée

II.3.3.4 - Établissement du plan topographique de la levée

II.3.3.5 - Investigations particulières

II.3.4 - Étude hydraulique

II.3.4.1 - Justification et objectif

II.3.4.2 - Contenu de l'étude hydraulique particulière

II.3.5 - Inspection visuelle

II.3.5.1 - Objet et dispositions générales

II.3.5.2 - Travaux préparatoires

II.3.5.3 - Points à observer et informations à répertorier

II.3.5.4 - Modalités de report et de restitution des informations

II.3.5.5 - Cas des portions de levées bordées par le fleuve

II.3.6 - Reconnaissances géotechniques

II.3.6.1 - Préparation du programme de reconnaissances

II.3.6.2 - Programme minimum de reconnaissances

II.3.7 - Modélisations : hydraulique interne et géomécanique

II.3.7.1 - Objet et dispositions générales

II.3.7.2 - Modélisation hydraulique interne

II.3.7.3 - Modélisation géomécanique

II.3.8 - Hiérarchisation cartographique des risques liés à la rupture

II.3.8.1 - Appréciation de l'aléa de rupture

II.3.8.2 - Appréciation de la vulnérabilité

II.3.8.3 - Évaluation des risques et synthèse cartographique

II.3.9 - Étude des solutions de confortement et autres dispositifs pour assurer la sécurité de la levée

II.3.9.1 - Objectif général

II.3.9.2 - Éléments de justification, dimensionnement et optimisation des ouvrages

II.3.9.3 - Contraintes à prendre en compte dans l'étude des avant-projets

II.3.10 - Synthèse et élaboration du programme d'intervention

ARTICLE II.4 - DISPOSITIONS APPLICABLES À CERTAINES NATURES DE TRAVAUX

II.4.1 - Prospection géophysique

II.4.1.1 - Préparation du terrain

II.4.1.2 - Prospection électromagnétique à émetteur/récepteur portatif mobile EM34

II.4.1.3 - Prospection électromagnétique à émetteur/récepteur radar

II.4.1.4 - Variante au dispositif de reconnaissance géophysique en continu

II.4.2 - Forages

II.4.2.1 - Réalisation des forages carottés et prélèvements d'échantillons intacts

II.4.2.2 - Réalisation des forages destructifs

II.4.2.3 - Équipement en piézomètre

II.4.2.4 - Documents à remettre après exécution

ARTICLE II.5 - MODALITÉS DE RESTITUTION DE L'ÉTUDE

II.5.1 - Documents d'étape

II.5.2 - Réunions intermédiaires

II.5.3 - Rapport final

CHAPITRE III : DISPOSITIONS ET RESPONSABILITÉS DIVERSES

ARTICLE III.1 - ACCÈS AUX DIFFÉRENTES PARTIES DE LA LEVÉE - PROTECTION DES BIENS ET DES RÉSEAUX

ARTICLE III.2 - SIGNALISATION, SÉCURITÉ ET COORDINATION DES CHANTIERS

ARTICLE III.3 - PROPRIÉTÉ ET CONFIDENTIALITÉ DES RÉSULTATS

ARTICLE III.4 - RESPONSABILITÉS DU PRESTATAIRE SUR LES RÉSULTATS DE L'ÉTUDE

ANNEXES AU C.C.T.P.

[Ce CCTP-type est rédigé pour le cas d'une levée n'ayant fait l'objet d'aucune des phases d'étude de la méthodologie-type de diagnostic validée pour les digues de la Loire moyenne et dans l'hypothèse où l'on souhaite confier la réalisation de l'ensemble de la démarche à un seul (groupe de) prestataire(s), au titre d'un marché unique. Aussi, le texte qui suit doit être considéré comme une trame « maximale » du cahier des clauses techniques de l'étude, à adapter suivant le contexte de l'opération : si l'une ou l'autre des phases d'étude (ex : analyse historique, plan topographique, inspection visuelle) est déjà réalisée ou doit être confiée à un prestataire indépendant, il convient d'amender le texte en conséquence, notamment en supprimant ou en simplifiant les paragraphes inutiles ou redondants.]

CHAPITRE I : CONTEXTE ET OBJET DE L'ÉTUDE

DISPOSITIONS GÉNÉRALES

ARTICLE I.1 - OBJET DU CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIÈRES (C.C.T.P.)

Le présent C.C.T.P. concerne les travaux d'étude de diagnostic approfondi à réaliser sur la levée de Loire dite du [...], du PK[...] au PK[...].

Il est accepté sans modification par le prestataire de l'étude qui est réputé, au jour de la remise de son offre, avoir effectué une reconnaissance d'ensemble des lieux et s'être pleinement rendu compte des difficultés de réalisation des travaux d'investigation demandés et de mise en œuvre de ses personnels et matériels.

ARTICLE I.2 - CONTEXTE ET JUSTIFICATION DE L'ÉTUDE

1.2.1 - Présentation rapide du secteur de levée

[Mentionner les principales caractéristiques géométriques de la levée, les événements importants connus de son histoire (construction, crues, brèches, travaux) et les études antérieures réalisées.]

1.2.2 - Spécificités et enjeux de l'étude

[Mettre en avant les spécificités du secteur de levée à étudier vis-à-vis de l'ensemble du dispositif d'endiguement de la Loire moyenne / identifier les principales contraintes s'appliquant à l'étude / justifier l'importance, la place dans le programme et les orientations de l'étude.]

ARTICLE I.3 - OBJECTIFS ET CANEVAS GÉNÉRAL DE L'ÉTUDE

1.3.1 - Objectifs

Les objectifs de l'étude de diagnostic approfondi se déclinent comme suit :

- disposer d'un état initial de la levée aussi précis et complet que possible ;
- apprécier les aléas de dysfonctionnement et/ou de rupture de la digue en rapport avec les contraintes hydrauliques externes (cotes atteintes par le fleuve en crue, durée de la mise en charge, évolution morphodynamique du lit), sa morphologie et sa constitution interne ;
- évaluer les enjeux exposés et quantifier les risques (croisement de l'aléa par la vulnérabilité) le long du secteur de levée ;
- concevoir au stade A.P.S. les travaux de confortement et toutes dispositions nécessaires à la sécurité des digues et ouvrages annexes vis-à-vis de la crue choisie en référence (cf article §I.4.1) ;
- proposer un ordre de priorité d'intervention en fonction des risques et en déduire une programmation des travaux ;
- récapituler et chiffrer, en investissement comme en entretien, le programme des travaux proposé.

1.3.2 - Canevas général de l'étude

[Adapter la rédaction ci-dessous si certaines phases d'étude (ex : topographie, inspection visuelle) ont déjà été réalisées par ailleurs.]

Le canevas général de l'étude est constitué des phases suivantes :

- (1) Étude historique
- (2) Étude morphodynamique
- (3) Levé topographique
- (4) Étude hydraulique
- (5) Inspection visuelle
- (6) Reconnaissances géotechniques
- (7) Modélisations : hydraulique interne et géomécanique
- (8) Hiérarchisation cartographique des risques liés à la rupture
- (9) Étude au stade A.P.S. des solutions de confortement et autres dispositifs pour assurer la sécurité des levées
- (10) Synthèse et élaboration du programme d'intervention

Le programme, le phasage et le planning détaillés de l'étude seront établis, par le signataire du présent C.C.T.P., dans un mémoire justificatif fourni dès la remise de son offre (se reporter au règlement de la consultation : article § [...] du R.P.A.O.) et complété dans le programme d'exécution à soumettre au visa du maître d'ouvrage après la notification du marché (cf article §II.2 du présent C.C.T.P.)

ARTICLE 1.4 - DISPOSITIONS GÉNÉRALES

1.4.1 - Crue de référence

[En principe, il s'agit au minimum du phénomène d'occurrence centennale si la levée protège des zones urbanisées : en tout état de cause, le choix de la crue de référence doit être effectué en relation avec les conclusions de l'étude hydraulique d'ensemble et en tenant compte de la vulnérabilité du val protégé / cas particulier : modifier le titre et le contenu de ce paragraphe si l'on souhaite travailler avec plusieurs intensités de crue.]

La crue choisie en référence pour toute l'étude est : *[En indiquer les caractéristiques (débit de pointe, durée, volume, fréquence) et/ou la source si l'on se réfère aux résultats d'une étude antérieure ou à une crue historique / en fournir, si possible, un hydrogramme-type.]*

D'une façon générale, il s'agit du phénomène vis-à-vis duquel, au titre de la présente étude, la sécurité de la levée devra être évaluée, les risques estimés et les confortements justifiés.

Les niveaux de charge à considérer sur la levée lors de cette crue de référence résulteront de l'étude hydraulique particulière décrite à l'article §II.3.4 du présent C.C.T.P.

1.4.2 - Référence pour le repérage kilométrique

La référence pour le repérage kilométrique est le PK de [...].

[Indiquer les caractéristiques du repérage PK, routier ou autre, retenu comme référence kilométrique pour l'ensemble de l'étude.]

CHAPITRE II : CONSISTANCE, MODALITÉS D'EXÉCUTION ET DE RESTITUTION DE L'ÉTUDE

ARTICLE II.1 - DOCUMENTS EXISTANTS ET ÉTUDES ANTÉRIEURES

[Établir la liste exhaustive des documents connus existants (cartes, plans, jeux de photographies aériennes, rapports, livres, dossiers de travaux...) et des études antérieures englobant, ou touchant, la zone d'étude / indiquer le lieu et le service où ils peuvent être consultés et les conditions de leur consultation / pour les principaux d'entre eux, fournir un résumé du contenu du document, des moyens et/ou de la méthode mis en œuvre et des résultats obtenus / au minimum, citer les références complètes des ouvrages suivants : le livre de de DION « Histoire des levées de la Loire », le mémoire de W.HALBECQ « Approche géomorphologique des brèches dans les levées de la Loire », l'étude hydraulique générale de l'Agence de l'Eau.]

Les documents signalés ci-dessus comme étant la propriété du maître d'ouvrage sont mis gracieusement à la disposition du prestataire pendant le délai d'exécution du marché et dans les conditions stipulées à l'article §13.2 du C.C.A.G.P.I..

[La rédaction du paragraphe précédent fait l'hypothèse que le Cahier des Clauses Administratives Générales (C.C.A.G.), rendu applicable au marché par l'article adhoc du C.C.A.P. (Cahier des Clauses Administratives Particulières), est le C.C.A.G. applicable aux marchés publics de prestations intellectuelles (P.I.).]

ARTICLE II.2 - PROGRAMME ET MOYENS D'EXÉCUTION DE L'ÉTUDE

II.2.1 - Établissement du programme d'exécution de l'étude

Dans un délai de [...] jours suivant la notification du marché, le titulaire du marché devra soumettre à l'agrément du maître d'œuvre un programme général d'exécution de l'étude.

Ce programme complètera le mémoire justificatif déjà établi en ce sens dès la soumission de l'offre (cf. article § [...] du R.P.A.O.) et indiquera notamment :

- les modalités d'exécution de l'étude et tous les moyens, tant en matériels qu'en personnels, mis en œuvre pour chaque phase de l'étude, ainsi que pour la coordination et la synthèse de l'ensemble des travaux ;
- les spécifications, sous la forme de fiches ou de notices, de tous les procédés, méthodes, dispositifs de mesures (géophysiques notamment), matériels, modèles ou logiciels qui seront employés ;
- les qualités et références (C.V.) des personnels du titulaire du marché, ainsi que celles de toutes les sociétés (cabinet de géomètres, foreur, entreprises spécialisées, laboratoire de mécanique des sols, etc.) et de leurs personnels, qui seront amenés à intervenir, sous sa responsabilité, dans le cadre de l'exécution du marché ;
- les dispositions adoptées en matière d'hygiène et de sécurité, de signalisation, de surveillance et de coordination des chantiers, en application de la Réglementation du Travail en vigueur ;
- le planning et le calendrier prévisionnel d'exécution.

Par la suite, au fur et à mesure de la progression des travaux, chaque phase d'étude, telle que définie dans les articles §II.3.1 à II.3.10 suivants, donnera lieu à l'établissement d'un sous-programme détaillé d'exécution (dont les éléments et choix intégreront notamment les résultats des phases précédentes) qui devra recevoir l'agrément du maître d'œuvre avant tout démarrage de la dite phase.

II.2.2 - Contraintes concernant l'ordre d'enchaînement des phases d'étude

Le titulaire de l'étude est tenu de respecter le phasage des travaux, tel que décrit dans l'article §II.3 suivant et qui établit un ordre logique dans la progression des reconnaissances et du diagnostic.

Certaines phases pourront cependant démarrer et/ou être conduites de concert (ex : l'étude hydraulique et l'inspection visuelle), si cela a été prévu dans le planning d'exécution agréé ou sur autorisation expresse du maître d'œuvre.

Dans tous les cas, le démarrage effectif d'une phase d'étude sera soumis à l'accord préalable du maître d'œuvre.

II.2.3 - Moyens d'exécution

Les moyens d'exécution comprennent :

- les matériels : machines, engins, appareils, dispositifs de mesures, outils informatiques (y compris modèles et logiciels), ...
- les personnels : chef de projet, experts, chargés d'études, entrepreneurs, manœuvres, opérateurs, ...

L'ensemble des moyens affectés à l'étude sont décrits, phase par phase, dans le programme d'exécution agréé (cf article §II.2.1 ci-dessus), que ceux-ci relèvent du titulaire du marché ou de sous-traitants agréés.

Le prestataire s'engage à mettre en œuvre des personnels qualifiés, expérimentés et dotés d'une compétence en rapport avec la (les) phase(s) d'étude où ils interviennent et/ou avec le poste de responsabilité qu'ils occupent (fonctions d'encadrement notamment).

ARTICLE II.3 - CONSISTANCE, SPÉCIFICATIONS GLOBALES ET MODALITÉS D'EXÉCUTION DES PHASES SUCCESSIVES D'ÉTUDE

II.3.1 - Étude historique : étapes de construction de la levée, grandes crues, ruptures et désordres

II.3.1.1 - Justification et objectif

A l'échelle de la Loire moyenne, la localisation des brèches historiques, loin d'être aléatoire, est largement déterminée par la géométrie du lit endigué et l'exposition de la levée aux assauts de la rivière en crue. On constate des facteurs particuliers de risque :

- l'étroitesse du lit entre les endiguements ;
- l'orientation de la levée par rapport à l'écoulement.

La recherche sur les causes de rupture des levées lors des grandes crues historiques (référence citée à l'article §II.1 : mémoire de M. W.HALBECQ, «*Approche géomorphologique des brèches dans les levées de la Loire*», 1996) montre que les brèches ont tendance à se produire à l'endroit ou à proximité d'anciennes brèches. Il a été noté, en outre, que les brèches répétées se localisaient de façon préférentielle sur les sites de rétrécissement du lit endigué.

Cette inégale répartition s'explique par le fait que, dans certains tronçons, la levée tente de s'opposer à une évolution morphodynamique puissante, d'où il résulte une faiblesse chronique. On peut également imputer un affaiblissement à des réparations de brèche généralement effectuées dans l'urgence.

Ceci justifie toute l'importance de la phase d'analyse historique dans le diagnostic approfondi du secteur de levée, objet de l'étude.

II.3.1.2 - Contenu de la phase d'étude

Il y a lieu, au titre de l'étude historique :

- de prendre connaissance et d'exploiter, à l'échelle du secteur de digue concerné, l'ensemble des documents disponibles et mentionnés à l'article §II.1 du présent C.C.T.P. : archives, plans, photos aériennes, études antérieures, dossiers de travaux de confortement ;
- de caractériser la constitution interne du corps de digue (grandes étapes de la construction, résultats d'éventuels sondages déjà réalisés,...) ;
- de localiser les brèches historiques, au vu de l'exploitation des documents disponibles ;
- de recenser et de localiser les repères de crues historiques ;
- d'effectuer un recensement et une synthèse sur les extractions de matériaux dans la zone.

[Préciser si une recherche particulière d'archives sera demandée au prestataire, comme, par exemple, un examen des archives départementales.]

II.3.2 - Étude morphodynamique du lit

[Les prestations demandées au titre des articles ci-dessous reposent sur l'hypothèse de l'absence de toute étude morphodynamique préexistante englobant le secteur de levée à diagnostiquer ; cependant, l'approche morphodynamique mérite d'être traitée à une échelle de distance généralement plus large (plusieurs kilomètres) que celle de l'étude diagnostic objet du C.C.T.P. : aussi, il serait souhaitable, à l'instar de l'approche hydraulique, de faire réaliser au préalable, hors marché, une étude morphodynamique « générale » et de ne prévoir ici qu'une étude morphodynamique « particulière » destinée à actualiser ou affiner localement la première ; dans un tel cas, la rédaction du présent article serait à amender en s'inspirant du plan de l'article §II.3.4 (étude hydraulique).]

II.3.2.1 - Justification et objectif

Un cours d'eau à sable tel que la Loire présente un mécanisme de déformation du lit menant à une grande constance (longueur d'onde des méandres, nombre de bras, îlots...) pour autant que les apports solides ne soient pas entravés à l'amont. Toutefois, des possibilités de modifications importantes existent lors d'événements hydrologiques rares, avec l'apparition d'une mise en suspension intense des matériaux. On constate une déformation régulière du profil en long avec la présence d'ondulations de fond ainsi que du tracé avec l'existence de méandres et îles, ces données pouvant être modifiées lors des très fortes crues par mise en suspension d'une forte quantité de matériaux. La présence des levées accentue sans doute le mécanisme. En outre, les extractions de matériaux peuvent également intervenir.

Dans ce contexte, l'objectif de l'approche morphodynamique est d'identifier les zones à risque historique (en prolongement de l'étude historique) et d'en comprendre les mécanismes, puis de déceler les évolutions actuelles défavorables.

11.3.2.2 - Contenu de la phase d'étude

Le travail réalisé par M. W.HALBECQ (cité en référence à l'article §II.1 ci-dessus) qui renseigne sur la localisation des ruptures, à l'échelle de la Loire moyenne, est à considérer, en premier lieu, pour centrer l'analyse morphodynamique sur les points essentiels. En ce qui concerne les cas les plus courants liés au rétrécissement local du lit, le processus en jeu est davantage hydraulique (surverse au niveau du verrou) que morphodynamique.

L'approche morphodynamique permettra cependant d'appréhender d'autres causes de rupture répertoriées ou probables :

- les ruptures se localisant au niveau des modifications de pente du chenal,
- des ruptures plus fréquentes lorsque la levée est immédiatement au contact du chenal principal,
- des points faibles aux extrados de méandres,
- des brèches situées dans des portions de cours d'eau à chenaux multiples avec présence d'îles végétalisées,
- des risques accrus d'érosion liés à des approfondissements du profil en long.

De manière générale, le diagnostic devra permettre d'identifier les évolutions passées et à venir du chenal : glissement des méandres, progression latérale des îlots, enfoncement du lit, points durs et ruptures de pente.

L'échelle spatiale pertinente d'analyse sera ici le secteur fluvial de plusieurs kilomètres encadrant le secteur de levée étudié, incluant le lit endigué et les vals de part et d'autre des levées. La connaissance des anciens bras ou chenaux d'expansion des crues renseignera sur les secteurs les plus sollicités.

L'analyse théorique de la morphodynamique de la rivière reposera sur les connaissances de l'hydrologie, de la sédimentologie et des caractéristiques morphométriques du fleuve. Un découpage sera réalisé à partir de la connaissance des pentes longitudinales, du tracé, des actions anthropiques (en particulier, les extractions entre levées ou derrière les levées) ; les singularités géologiques éventuelles seront recherchées.

L'étude comparative des profils en long et en travers du cours d'eau sera réalisée à différentes échelles de temps sur les documents existants. Les modifications du tracé seront évaluées en termes de coefficient de sinuosité des méandres et de rayon de courbure et en termes de densité de réseau hydrographique. On notera l'évolution dans le temps de l'importance et de la végétalisation des îles (rappelons que la présence d'une île implique un rétrécissement local, une divergence des lignes de courant avec report d'une partie de l'énergie vers les berges, et un mouvement hélicoïdal des masses d'eau augmentant de manière sensible les forces tractrices sur les berges).

Les constantes seront également mises en évidence (longueur d'onde de méandre ou/et nombre de bras en particulier). L'analyse hydrologique et les profils types de cours d'eau permettront d'estimer des vitesses de courant par zone et les forces tractrices sur le fond et les berges (débit plein bord du lit mineur).

[S'assurer que les sources disponibles parmi les suivantes sont citées dans l'article §II.1 du C.C.T.P. :

- cartographie au 1/20 000 du Val de Loire dressée d'après l'arpentage effectué en 1848,
- les profils en long de la Loire de Briare à Nantes tracés après la crue de 1856 et sur lesquels sont portés :
 - . les profils en long des levées, tracés après la crue de 1846 et donnant une indication des hauteurs des levées et des banquettes mises en place après 1846,
 - . les lignes d'eau de 1856 et 1866,
 - . les lignes d'eau des étiages de 1858 et 1859.
- les cartes IGN anciennes,
- les cartes IGN au 1/25 000 actuelles,
- profils en long et profils en travers anciens dont le profil en long de l'étude Sogreah (topographie 1965 à 1980),
- bathymétrie à diverses dates,
- profil en long et profils en travers de 1996,
- photos aériennes à différentes époques.]

Une analyse de terrain sera effectuée pour permettre d'affiner et nuancer les résultats de l'analyse théorique décrite ci-dessus. La reconnaissance du réseau sera effectuée par tronçon préalablement défini. Cette visite permettra d'appréhender la composante sédimentologique et renseignera sur les processus d'évolution. On définira les types d'érosions (par pans, par effritement, par encoches) et de dépôts (convexités, élargissements-perdes de charges, raisons exogènes, embâcles). On repérera les profils apparemment stables ou instables et analysera les évolutions possibles : avancée de train de méandres (érosion vive à l'extrados, banc de convexité en cours de végétalisation), enfoncement du lit (ripisylve perchée, traces évidentes aux ouvrages, ruptures de pente). L'évolution longitudinale de la granulométrie sera appréciée à vue, afin de préciser la dynamique.

En ce qui concerne les lieux de rétrécissement brusque engendré par la levée, on peut s'attendre à un enfoncement à l'entrée du rétrécissement qui pourra avoir des conséquences sur la stabilité de la digue. Cette sensibilité à l'affouillement sera recherchée dans les documents d'archive et pourra, si nécessaire, être précisée par un levé bathymétrique.

II.3.3 - Levé topographique

II.3.3.1 - Objectif global et dispositions générales

L'objectif des reconnaissances topographiques à exécuter est triple :

- établir le lien avec les lignes d'eau en crue ;
- préciser les profils en travers pour les études géotechniques ;
- fournir un instrument de report et de suivi des digues.

Tous les documents à établir au titre des reconnaissances topographiques seront rattachés à la référence kilométrique fixée à l'article §I.4.2 du présent C.C.T.P. Les précisions requises sont de $\pm 2,5$ cm en altitude et ± 10 cm en plan. Les altitudes seront rattachées au N.G.F.

II.3.3.2 - Établissement des profils en long de la levée par rapport aux plus hautes eaux en crues

L'analyse historique montre que les deux tiers des brèches du siècle dernier (en incluant le brèches de retour à la rivière) sont dues à un surversement. Les modélisations hydrauliques réalisées, pour l'ensemble de la Loire moyenne, dans le cadre de l'étude hydraulique de référence de l'Agence de l'Eau (cf libellé complet à l'article §II.1) et/ou effectuées au titre de la présente étude (cf article §II.3.4 ci-après), fournissent, dans différents scénarios d'aménagement, les lignes d'eau de référence par rapport auxquelles il convient d'assurer une revanche suffisante.

Dans ce contexte, il est demandé d'établir, au titre de la présente étude, deux profils en long au pas de [...] m de la crête de digue, le premier sur le sommet de la banquette et le second sur la plate-forme de couronnement, afin de déterminer la revanche disponible et de mettre en évidence les tronçons où cette revanche est insuffisante.

[Choisir un pas de levé compris entre 20 et 25 m / adapter la rédaction du paragraphe précédent si la banquette est inexistante : dans ce cas, seul le profil en long sur la plate-forme de couronnement est nécessaire.]

Afin de permettre le rapprochement entre les hauteurs d'eau de référence et la géométrie de la levée, les profils en long des levés seront également rattachés avec précision au PK hydraulique de la codification hydrographique Loire Bretagne.

[Modifier la rédaction du paragraphe précédent si le PK hydraulique choisi pour référence n'est pas celui indiqué.]

II.3.3.3 - Établissement des profils en travers de la levée

En crue, la digue a pour fonction de maintenir la différence de niveau hydraulique entre le lit endigué et le val. Avec une charge hydraulique sur la digue de l'ordre de 5 ou 6 m pour les crues exceptionnelles, les mécanismes de rupture à redouter sont le renard (érosion régressive de la digue ou de sa fondation) et l'instabilité du talus côté val pendant la crue et côté Loire pendant la décrue. Dans les deux cas, l'analyse du risque de rupture nécessite une bonne connaissance des profils en travers de la levée. Ces profils en travers fournissent également la donnée de base pour les études de confortement (cf articles §II.3.7 et §II.3.9 ci-dessous).

Au titre de la présente étude, il sera établi des profils en travers espacés de [...] mètres en zone homogène et de [...] mètres dans les zones complexes, incluant une bande coté fleuve et coté val de largeur d'au minimum 10 mètres de part et d'autre des pieds de talus ; chaque profil comportera au minimum 12 points. Selon la configuration (présence d'ouvrages singuliers en particulier), des points supplémentaires seront levés autant que nécessaire pour la précision du profil.

[Mentionner un espacement de profils compris entre 100 et 200 mètres en zone homogène, 50 et 100 mètres en zone complexe / selon le mode de rémunération choisi pour le marché (sur prix unitaires - à recommander : cf note en annexe au présent C.C.T.P. - ou au forfait), prévoir les postes de prix nécessaires dans le bordereau des prix ou préciser dans le paragraphe précédent les éléments de métré respectifs.]

Lorsque le talus côté Loire et/ou son pied sont en eau, le profil sera complété par bathymétrie, avec mention de la cote du fleuve et de la date au jour du levé.

Sur le terrain, les profils en travers seront matérialisés de façon durable (marqueur indélébile, plaque, cheville) à raison d'au moins un point en crête par profil.

II.3.3.4 - Établissement du plan topographique de la levée

Il sera établi un plan topographique au 1/500 du secteur de levée objet de l'étude, débordant d'au minimum 10 mètres de part et d'autre des pieds de talus.

[Modifier l'échelle citée précédemment si le 1/1 000 est souhaité.]

Ce plan constituera le document de base pour le suivi et la maintenance de la levée et servira, notamment, de support pour le report des informations issues de l'inspection visuelle (cf article §II.3.5 ci-après).

Le réseau des points à lever sera organisé et adapté de façon à refléter toutes les singularités topographiques remarquables rencontrées : terrassements en déblai ou en remblai, routes et chemins, fossés, érosions, dépressions, constructions (murs, bâtiments, ouvrages d'art ou de protection, regards ou débouchés de canalisation, ouvrages et poteaux de distribution électrique et de ligne téléphonique, etc.).

Sur le document de restitution, les profils en long et les profils en travers réalisés seront reportés ainsi que tous les points levés avec mention de leur cote N.G.F.. Les informations cartographiques seront dessinées ou symbolisées en application des dispositions réglementaires visées à l'article § [...] du C.C.A.P. du marché.

[Viser ci-dessus un article adhoc du C.C.A.P. où peuvent être mentionnés les arrêtés :

- fixant les conditions d'exécution et de publication des levés de plan établis par les services publics (J.O. du 2/06/1948),*
- fixant les signes conventionnels à employer dans la rédaction des plans pour le compte des services publics (J.O. du 8/06/1957),*
- du 21/01/1980 fixant les tolérances applicables aux levés à grande échelle établis par les services publics (J.O. du 2/06/1948) et instruction d'application du 28/01/1980.]*

Pour la représentation sur le plan des informations non dotées d'un signe conventionnel par la réglementation, le titulaire du marché devra utiliser des symboles et une légende adoptés en concertation avec le maître d'œuvre.

[Il est recommandé pour le paragraphe précédent de pouvoir faire, à terme, référence à une norme de représentation s'appliquant à l'ensemble des levées de la Loire.]

II.3.3.5 - Investigations particulières

[À rédiger de façon appropriée si des interventions particulières sont demandées : réalisation d'un photoplan, bathymétrie au sonar latéral, etc. / prévoir alors les postes correspondants dans le bordereau des prix du marché.]

II.3.4 - Étude hydraulique

II.3.4.1 - Justification et objectif

Le surversement apparaît clairement comme la première cause de rupture des levées. Il résulte généralement d'une surélévation locale de la ligne d'eau liée à un obstacle ou une singularité hydraulique (rétrécissement brusque à l'approche d'un ouvrage, zone de forte courbure,...) ou d'un abaissement localisé de la crête de digue. Il convient également de prendre en compte les risques d'érosion mécanique pouvant affecter la digue lorsque le fleuve est en crue.

On dispose d'une étude hydraulique générale de la Loire moyenne réalisée par l'Agence de l'Eau (cf libellé complet à l'article §II.1), qui est la référence hydraulique à retenir pour la prestation, objet de ce C.C.T.P.. Néanmoins, cette étude générale ne prenant pas en compte toutes les singularités locales, il est demandé de la compléter par une étude hydraulique particulière, dont la teneur est à adapter en fonction de la complexité de la morphologie du lit endigué (variation rapide de la section hydraulique, courbure du lit, orientation biaisée de la levée par rapport à la direction du courant,...) dans le secteur étudié au titre du présent marché.

II.3.4.2 - Contenu de l'étude hydraulique particulière

En premier lieu, il sera établi une synthèse des résultats de l'étude hydraulique de référence visée à l'alinéa précédent. Il est demandé à ce stade d'adapter les résultats de l'étude hydraulique générale et de caler les niveaux de crues de référence par rapport à la levée objet du diagnostic.

Dans un deuxième temps, il sera réalisé un modèle hydraulique local sur le tronçon de rivière encadrant le secteur de levée à diagnostiquer. Le modèle général disponible fournira les conditions aux limites du modèle local à élaborer.

Suivant la morphologie du lit et la complexité des problèmes mis en évidence, le modèle local sera :

- soit un simple modèle filaire en régime permanent dans le but de transférer (et préciser ou compléter), vers le secteur de levée à expertiser, les résultats de la modélisation d'ensemble : actualisation éventuelle de la bathymétrie, analyse paramétrique, ...;

- soit un modèle bidimensionnel type Saint-Venant pour analyser des conditions hydrauliques plus complexes à proximité des digues : surélévation locale de la ligne d'eau, orientation du courant, vitesse de courant. Dans ce cas, le prestataire de l'étude procédera aux levés topographiques complémentaires éventuellement nécessaires pour affiner localement les données bathymétriques disponibles.

[Prévoir les postes de prix adhoc (modèle filaire/modèle bidimensionnel) dans le bordereau des prix du marché / modifier la rédaction du paragraphe précédent si on souhaite imposer d'emblée l'un des deux types de modèles.]

Deux débits de crue devront être considérés dans le modèle :

- celui correspondant au premier déversement par le déversoir dans le val protégé,
- celui correspondant au niveau maximal atteint pendant la crue de référence (cf article §1.4.1).

Comme pour l'ensemble de l'étude, les niveaux seront systématiquement rattachés au N.G.F..

L'aléa de rupture par submersion résultera de la comparaison entre les lignes d'eaux maximales et le profil en long précis de la crête de digue (cf article §II.3.3.2).

L'aléa d'érosion mécanique sera également évalué, en fonction des sollicitations hydrauliques mises en évidence (hauteur de charge, vitesse des courants, tendance à l'affouillement, perturbations hydrauliques diverses) et de la configuration locale de la digue. Les résultats de l'étude hydraulique seront notamment exploités pour dimensionner les protections hydrauliques (ex: blocage des pieds de digue ou revêtement des talus avec des enrochements libres, protections végétales,...) à éventuellement préconiser au titre de la phase d'étude des confortements (cf article §II.3.9 du présent C.C.T.P.).

[Cas particulier où l'étude de diagnostic porte sur la levée d'un affluent de la Loire (Cher, Indre ou Vienne, a priori non doté d'une étude hydraulique de référence) : modifier la rédaction du paragraphe dans le sens d'une étude hydraulique plus complète devant aboutir à la définition des niveaux de référence à considérer.]

II.3.5 - Inspection visuelle

II.3.5.1 - Objet et dispositions générales

L'inspection visuelle a pour principal objet de repérer les indices de désordres pouvant affecter la digue. Elle permet d'établir un état initial objectif de la levée (afin d'en suivre l'évolution ultérieure) et de recueillir des informations qui pourront orienter les modalités d'exécution des reconnaissances géotechniques.

L'inspection s'effectuera en parcourant intégralement à pied le linéaire de la levée à diagnostiquer et en répertoriant toutes les informations visuelles, d'une part sur les caractéristiques morphologiques externes de l'ouvrage (du moins sur celles non répertoriées par ailleurs, en particulier sur le plan topographique) et, d'autre part, sur les désordres ou les présomptions de désordre affectant l'une ou l'autre de ses composantes (crête, talus et pieds de talus côté val et côté fleuve).

Si la période et le planning d'exécution du marché l'autorisent, l'inspection sera conduite en dehors de la période de végétation (automne et hiver) afin de bénéficier de conditions de visibilité optimales.

[Préciser ici éventuellement l'état d'embroussaillage de la digue et si des travaux de dégagement - a priori hors marché d'études - sont prévus.]

Le prestataire de l'étude préviendra le gestionnaire de la levée au moins 48 heures à l'avance du démarrage de l'opération d'inspection, afin que le garde-digue puisse y participer s'il le juge utile.

11.3.5.2 - Travaux préparatoires

Préalablement à la visite de reconnaissance, l'analyse documentaire prévue à l'article §II.3.1 ainsi que le plan topographique (article §II.3.2) doivent être réalisés. La visite proprement dite sera précédée d'un entretien préliminaire avec le gestionnaire ou le surveillant de la digue. Après la visite, il conviendra, si nécessaire, de procéder à un nouvel entretien pour discuter des points particuliers apparus à l'inspection visuelle.

A l'issue de l'entretien préalable avec le gestionnaire et sur la base éventuelle d'une première reconnaissance visuelle rapide, le prestataire établira un note d'exécution précisant les modalités pratiques retenues pour la conduite de l'inspection : nom et qualité des opérateurs (deux au minimum), sections élémentaires de description, repérage des points de recalage kilométrique, matériel emporté, points particuliers à observer, etc. Cette note sera soumise à l'agrément préalable du maître d'œuvre avant tout début d'exécution de l'opération.

11.3.5.3 - Points à observer et informations à répertorier

Les opérateurs seront munis d'un tirage d'un plan au 1/500 de l'ouvrage, du cahier des profils en travers, d'un appareil photographique ainsi que d'un jeu de fiches de relevé des désordres (cf article §II.3.5.4 ci-après), fourni par le maître d'ouvrage.

a) Pour ce qui concerne les caractéristiques morphologiques de la levée, il s'agira de vérifier et compléter les principales informations topographiques disponibles (notamment sur la vue en plan) : cela nécessitera de se repérer sur le plan existant au fur et à mesure de la progression.

Des profils en travers seront levés aux sections où il apparaît des singularités non visibles ou mal répertoriées sur le plan (ex : maison ou construction édifiée à proximité de, sur ou dans la levée). On s'attachera également à indiquer les niveaux d'eau constatés le jour de la visite (cotes du fleuve et des plans d'eau côté val).

b) Pour ce qui concerne les indices de désordre, les points à plus particulièrement observer sont les suivants, partie par partie de la digue :

- talus et pied de talus côté val :

- . végétation (nature et développement, racines et souches) ;
- . amorces de glissement, ravinements ;
- . terriers (taille et densité) ;
- . débouchés de canalisation 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 et développement, racines et souches) ;
- . existence et état de la voie de circulation (route, chemin) ;
- . fissures longitudinales, fissures transversales ;
- . tassements, fontis ;
- . terriers (taille et densité) ;
- . existence, nature et état du dispositif de rehausse (vérifier, en particulier, l'état du contact avec le corps de digue) ;
- . existence, nature et état du revêtement (déversoir) ;
- . ouvrages singuliers.

- *talus et pied de talus côté fleuve* :

- . végétation (nature et développement, racines et souches) ;
- . amorces de glissement ou d'érosion, ravinements, fontis ;
- . terriers (taille et densité) ;
- . débouchés de canalisation et ouvrages singuliers ;
- . zones humides, points d'eau et laisses de crue ;
- . existence, nature et état du revêtement de protection (perré, masque béton,...) ;
- . existence, nature et état de la protection de pied de talus (rideau de pieux ou de palplanches,...) ;
- . singularités topographiques au delà du pied de talus (érosions de berge, dépôts alluvionnaires, fontis).

Parmi les ouvrages singuliers, une attention particulière mérite d'être portée aux maisons ou constructions situées à proximité de, ou incorporées dans, le corps de digue et qui constituent des zones de faiblesse potentielle de la digue : il conviendra de les cartographier avec précision (repérage en plan et en profil), si le plan topographique disponible ne les a pas - ou incomplètement - exhibées.

Les éventuels dispositifs d'auscultation découverts seront repérés en plan et caractérisés (nature de l'instrument, état de fonctionnement, etc.). S'ils sont à lecture simple (limnimètres, piézomètres notamment), il sera procédé à la mesure avec saisie de la date.

Enfin, les riverains, rencontrés au hasard de la visite, seront interrogés sur le fonctionnement de la digue en crue et les éventuels récents travaux d'entretien réalisés. La teneur des témoignages ainsi recueillis est reportée dans les zones de commentaires des fiches de désordres.

II.3.5.4 - Modalités de report et de restitution des informations

Les opérateurs de l'inspection utiliseront des fiches-standard de relevé des désordres, mises à leur disposition par le maître d'ouvrage et dont un modèle est joint en annexe au présent C.C.T.P., accompagné d'une notice d'utilisation dont le prestataire s'engage à respecter les consignes.

Les désordres inventoriés seront repérés et numérotés, partie par partie d'ouvrage, directement sur un tirage du plan topographique au 1/500, en respectant un symbolisme agréé par le maître d'œuvre. Les numéros renvoient à des lignes successives de la fiche de relevé des désordres où seront portées les annotations de détail et où l'on codera les principales informations. Les profils en travers levés sur le terrain seront dessinés au verso des fiches et seront repérés suivant le PK de référence fixé pour l'étude.

Il sera, en outre, établi un dossier photographique complet, parfaitement légendé :

- photos de désordre, référencées par le numéro de désordre, avec éléments permettant d'avoir l'échelle de la prise de vue ;
- photos d'ensemble de la levée aux points représentatifs.

Enfin, au terme de l'inspection, le prestataire procédera à la mise au propre de toutes les informations récoltées ainsi qu'à la saisie informatique des fiches de désordres sur un logiciel et un masque de saisie fournis par le maître d'ouvrage ou, à défaut, compatibles avec les outils de ce dernier : [...].

[Préciser ci-dessus le nom des logiciels concernés : Excel, Access, ...]

II.3.5.5 - Cas des portions de levées bordées par le fleuve

Sur ces zones, la reconnaissance devra être complétée côté fleuve par une inspection par barque (cas d'un pied de talus subvertical, inaccessible et/ou boisé). L'inspection par barque fait partie de la prestation de base lorsque le pied de levée est noyé et sa réalisation dans ce cadre ne donnera lieu à aucune plus-value.

[Dans le cas où il existe un perré ou une protection de pied se prolongeant sous le niveau d'étiage et dont on suspecte ou redoute la dégradation, ajouter, comme prestation, la réalisation d'une visite subaquatique sur le linéaire concerné, rémunérée par un prix spécial du bordereau des prix et comprenant l'élaboration préalable par le prestataire d'une note justificative précisant les moyens et conditions de mise en œuvre ainsi que la qualification de l'entreprise exécutante et de ses plongeurs / supprimer cet article II.3.5.5 si la totalité de la levée à diagnostiquer se situe loin du fleuve.]

II.3.6 - Reconnaissances géotechniques

II.3.6.1 - Préparation du programme de reconnaissances

Le programme de reconnaissances géotechniques et géophysiques sera préparé par le prestataire à la lumière des résultats des trois phases d'étude ci-après :

- l'approche historique (cf article §II.3.1) ;
- le levé topographique à échelle détaillée (cf article §II.3.3) ;
- l'inspection visuelle (cf article §II.3.5)

L'approche historique fournit des informations préalables sur l'environnement géologique ainsi que sur la constitution de la levée et les accidents - sources de discontinuité - qu'elle a connues (brèches et/ou confortements). Le levé topographique est indispensable au repérage des sondages et des transecs de prospection à réaliser et, associé à l'inspection visuelle, contribue à une première identification des points ou tronçons singuliers à étudier plus particulièrement.

En outre, une réflexion préliminaire sur les moyens de confortement pertinents et/ou envisageables (cf article §II.3.9) peut également s'avérer utile à l'orientation de certaines reconnaissances (ex : dans la perspective d'une paroi moulée, une attention plus particulière doit être portée à l'investigation des fondations de la digue).

La préparation du programme devra aboutir :

- au choix des moyens de reconnaissance géotechnique a priori les plus adaptés au contexte ;
- à l'implantation physique des dites reconnaissances.

Le programme des reconnaissances géotechniques et géophysiques, établi par le prestataire, reprendra le programme minimum fixé à l'article §II.3.6.2 suivant, en précisera les spécifications techniques détaillées, le planning et les moyens d'exécution (matériels et personnels) et présentera les éventuelles reconnaissances optionnelles ou variantes envisagées. Le document correspondant sera soumis à l'agrément préalable du maître d'œuvre.

II.3.6.2 - Programme minimum de reconnaissances

Sont successivement abordés ci-après : les moyens de reconnaissance géophysique en continu, les reconnaissances ponctuelles à caractère systématique, les reconnaissances approfondies sur points singuliers.

a) Reconnaissances géophysiques en continu

Deux objectifs sont assignés à la reconnaissance en continu :

- sous contrôle d'un étalonnage préalable du (ou des) dispositif(s) utilisé(s) et d'une analyse croisée avec les résultats des sondages systématiques (cf b.), fournir une vision spatiale de la constitution de la digue et apprécier son degré d'hétérogénéité ;
- mettre en évidence des points ou des tronçons singuliers, susceptibles d'échapper à la campagne de sondages ponctuels systématiques.

L'association de méthodes préconisée au titre de l'étude est la suivante :

- une prospection électromagnétique de type EM34, en crête de digue, avec au moins deux mesures par station ;
- une prospection au radar géologique avec deux antennes. La méthode radar pouvant être perturbée par la présence d'une chaussée, la prospection sera conduite, si possible, sur une ligne parallèle à la route de crête, en sommet du talus côté val.

Toute variante au dispositif fixé ci-dessus devra faire l'objet d'un agrément préalable du maître d'œuvre, sur présentation d'une note justificative circonstanciée, rédigée par le prestataire de l'étude. En cas de refus d'agrément, le prestataire sera tenu de mettre en œuvre le dispositif ci-dessus (EM34 et radar), prévu contractuellement.

[Si nécessaire, prévoir dans le C.C.A.P. la possibilité de présenter des variantes dès la soumission de l'offre /si le C.C.A.P. n'autorise pas les variantes, supprimer le paragraphe précédent.]

[Dans des contextes géologiques particuliers, des reconnaissances en continu supplémentaires sont à envisager (par exemple, dans les zones à phénomènes karstiques potentiels, la réalisation de profils sismiques en continu, au pied des talus, permettra de suivre le profil en long de la fondation et de repérer des thalwegs aveugles, sièges éventuels de circulation karstique) : le présent paragraphe devra dès lors être complété en ce sens (rajouter la ou les méthodes concernées à l'association préconisée en solution de base).]

b) Reconnaissances ponctuelles à caractère systématique

Les reconnaissances à caractère systématique - en ce sens qu'elles sont répétées le long de la levée à diagnostiquer - ont pour objet de caractériser certes ponctuellement, mais de façon précise, la constitution et une (ou plusieurs) propriété(s) importante(s) de la digue. En outre, les informations recueillies contribuent à l'indispensable calage des méthodes géophysiques (EM34 et radar, en solution de base) mises en œuvre précédemment en continu. Les reconnaissances ponctuelles comprennent, essentiellement, des sondages et des essais géotechniques.

Le programme-type contractuel de sondages systématiques est le suivant :

- **tous les 200 mètres** : en crête de digue, sondage pénétrométrique (statique, dynamique classique ou dynamique léger), jusqu'à atteindre la fondation (8 à 12 m) ;

NB : cette valeur de 200 mètres est volontairement choisie comme du même ordre que la longueur moyenne des brèches du siècle dernier (190 m). Ainsi, on peut espérer que la plupart des brèches historiques seront interceptées par au moins un sondage.

- **tous les 2 kilomètres** :

- *en crête de digue, côté val* : un sondage carotté poursuivi en fondation (12 à 15 m) et équipé d'un piézomètre, avec :

. 2 prélèvements d'échantillons intacts de classe 1 (avec essais en laboratoire de mécanique des sols : identification et mécaniques) dont un en fondation,

[Si nécessaire, remplacer, dans l'alinéa précédent, les 2 prélèvements d'échantillons par 3 essais au phicomètre.]

. 2 essais de perméabilité Lefranc, dont un en fondation ;

- *en bas de talus, côté val* : un sondage destructif avec enregistrement des paramètres, poursuivi en fondation (5 à 10 m) et équipé d'un piézomètre ;

- *en section transversale* : une prospection EM34 et un profil radar, se prolongeant au delà des pieds de talus.

Les espacements de sondages indiqués ci-dessus (200 m et 2 km) doivent être interprétés comme des moyennes, et non de façon absolue. Sous réserve de l'accord préalable du maître d'œuvre, les espacements pourront localement être modifiés afin de positionner tel ou tel profil de sondages bien à l'intérieur d'un secteur apparaissant comme pertinent suite aux prospections géophysiques en continu ou à l'inspection visuelle.

[Lorsqu'on s'intéresse essentiellement, voire exclusivement aux caractéristiques de perméabilité de la digue (cas d'une levée ayant déjà fait l'objet de sondages ou essais mécaniques et/ou apparaissant comme largement dimensionnée au plan mécanique), la reconnaissance systématique préconisée en solution de base pourra s'appuyer sur l'utilisation du seul Perméafor à raison d'un essai tous les 200 mètres, poursuivi en fondation : dans un tel cas, la rédaction du présent paragraphe devra être amendée en conséquence.]

c) *Reconnaitances approfondies sur points ou tronçons singuliers*

Elles sont à réaliser aux points ou tronçons de levée où les investigations en continu ou à caractère systématique, ou encore l'inspection visuelle, ont mis en évidence des anomalies ou des singularités, susceptibles de révéler l'existence d'une zone de faiblesse dans la digue.

Par définition, la teneur de telles reconnaissances est à adapter, au cas par cas, à la (aux) situation(s) rencontrée(s).

Par exemple :

- une prospection radar approfondie permet de repérer le contour ou le tracé de singularités à interface très tranchée comme celle d'un ouvrage dur enfoui dans le sol (ex : ancienne canalisation, maçonnerie) ou d'un gros vide ;

- les méthodes électriques, du type panneau électrique sont adaptées à la cartographie de zones singulières de sol à faible résistivité (ex : poche d'argile, horizon humide).

Le programme des éventuelles reconnaissances approfondies sur points singuliers sera donc entièrement établi, en cours d'étude, par le prestataire en fonction des résultats des étapes et investigations précédentes. Les prestations prévues dans ce programme feront exclusivement référence aux postes du bordereau des prix du marché. Il sera joint au programme un sous-détail estimatif indiquant les quantités prévisionnelles relatives à chaque prestation. Ce programme sera soumis à l'agrément préalable du maître d'œuvre avant tout début d'exécution.

[La rémunération des prestations particulières visées à cet article doit se faire sur bordereau des prix unitaires, avec quantités indicatives portées dans le détail estimatif initial du marché : ceci nécessite d'établir un bordereau de prix le plus large possible, couvrant toute la gamme des prestations géotechniques applicables pour l'étude (la prise en compte en cours d'étude d'une prestation géotechnique non prévue au bordereau des prix nécessitant la passation d'un avenant).]

II.3.7 - Modélisations : hydraulique interne et géomécanique

II.3.7.1 - Objet et dispositions générales

La modélisation numérique a pour objet de tester, à l'appui de logiciels spécialisés, une gamme de cas de charge sur la digue à diagnostiquer, sous un large faisceau d'hypothèses.

L'intérêt évident des outils de modélisation ne doit cependant pas faire oublier deux limitations importantes :

- tout modèle est une simplification intellectuelle de la réalité qui repose sur la représentation plus ou moins complète de quelques phénomènes physiques et de leurs interactions (parmi lesquelles les conditions aux limites) ;
- la qualité du résultat d'une modélisation est, d'autre part, directement dépendante de la qualité et de la représentativité des données servant à fixer les paramètres du modèle.

Dans le contexte des digues de la Loire, la modélisation trouve essentiellement ses limites sur le second point : les levées sont hétérogènes et certains paramètres des modèles sont difficiles à obtenir de façon représentative et fiable (en particulier les caractéristiques mécaniques).

La modélisation de la levée sera donc menée en application des dispositions suivantes :

- procéder à un calage systématique et pertinent des paramètres et des conditions aux limites ;
- considérer les cas de charge probables résultant des phases précédentes de l'étude (étude hydraulique, en particulier) et évaluer le comportement de la digue dans ces différentes configurations ;
- vérifier systématiquement la sensibilité des résultats en faisant varier les données dans des plages issues des résultats des reconnaissances ou issues d'autres études ;
- utiliser les modèles pour comparer entre elles diverses solutions de confortement et/ou optimiser leur dimensionnement et ce, en liaison avec la phase d'étude des confortements (cf article §II.3.9 ci-après).

Les modèles utilisés à ces fins par le prestataire seront spécifiés dans son programme d'exécution agréé (cf article §II.2 ci-dessus). La gamme des cas de charge et les diverses hypothèses prises en compte dans la modélisation seront soumises à l'agrément préalable du maître d'œuvre, sur présentation d'une note explicative.

II.3.7.2 - Modélisation hydraulique interne

Le modèle d'écoulement interne (dans les sols) à mettre en œuvre sera basé sur un calcul en régime permanent, avec des perméabilités supposées constantes pour chacune des couches.

[L'utilisation d'un modèle calculant en régime transitoire n'est a priori pas nécessaire, sauf si l'on souhaite disposer d'une estimation du volume total des fuites pour un hydrogramme de crue donné.]

Compte tenu de l'imprécision sur les données (géométrie exacte des couches, valeurs de perméabilité à saturation, variation de la perméabilité en fonction du degré de saturation), le prestataire s'attachera à faire plusieurs simulations avec des perméabilités différentes, prises dans la gamme des valeurs issues des essais géotechniques (cf article §II.3.6).

La modélisation hydraulique devra notamment conclure sur les points suivants :

- détermination de la piézométrie interne de la digue en crue pour injecter les résultats dans la simulation mécanique (cf article §II.3.7.3 suivant) ;
- détermination des gradients hydrauliques pour identifier les risques de formation de renard ;
- estimation des débits de fuite.

II.3.7.3 - Modélisation géomécanique

Du fait de l'hétérogénéité des matériaux et de la difficulté de disposer de caractéristiques mécaniques représentatives (d'autant plus que les essais in situ effectués sur la digue « à sec » donnent des résultats surévaluant très probablement les caractéristiques des matériaux saturés), la modélisation géomécanique comprendra une étude paramétrique sur ces caractéristiques, en prenant en compte la piézométrie issue de la modélisation hydraulique (cf article §II.3.7.2 précédent) et/ou d'hypothèses simplificatrices, à faire valider au préalable par le maître d'œuvre.

Le modèle mis en œuvre sera de type calcul de stabilité à la rupture en privilégiant, sauf configuration particulière de la digue ou cas des ouvrages annexes, le mécanisme de rupture circulaire.

[L'utilisation d'un modèle plus sophistiqué, tel que calcul aux éléments finis, n'est a priori pas nécessaire, sauf cas particulier.]

Au minimum, les scénarios de rupture suivants seront à tester :

- rupture du talus côté val, Loire en crue, corps de digue partiellement ou totalement saturé ;
- rupture du talus côté fleuve, Loire en décrue, corps de digue partiellement ou totalement saturé, charge éventuelle induite par une inondation du val ;
- instabilité des ouvrages annexes ou singuliers - tels que revêtement de protection côté fleuve (ou côté val), murette de rehausse, mur de soutènement etc., s'ils existent - pour différents cas de charge (en crue : poussée des eaux du fleuve et/ou saturation du corps de digue et/ou sous-pressions en fondation ; à la décrue : saturation du corps de digue et/ou sous-pressions en fondation et/ou surcharges routières ; à sec : poussée des terres avec surcharges routières) et selon la capacité de drainage des dits ouvrages.

Le prestataire sera, cependant, tenu de prendre en compte tous les autres scénarios de rupture (concernant la digue et ses ouvrages annexes) que les phases précédentes de l'étude de diagnostic auraient mis en évidence.

Le travail de modélisation sera conduit en deux étapes :

- simulations à l'état actuel ;
- simulations à l'état conforté.

Les simulations à l'état actuel permettront d'apprécier le niveau de sécurité de la digue et de ses ouvrages annexes dans les différentes configurations de sollicitation.

Les simulations à l'état conforté permettront d'évaluer l'amélioration apportée par un confortement, de comparer entre elles différentes solutions d'aménagement et d'optimiser leur dimensionnement. Cette phase particulière de simulations ressort de l'étude des confortements prévue à l'article §II.3.9 du présent C.C.T.P..

II.3.8 - Hiérarchisation cartographique des risques liés à la rupture

Il sera procédé à une évaluation des risques liés à la rupture ou au dysfonctionnement de la levée. Pour ce faire, les conséquences de la rupture de la digue seront sommairement appréciées, afin de hiérarchiser les tronçons de levée et d'adapter, le cas échéant, à la vulnérabilité du val protégé les moyens de diagnostic ou de confortement mis en œuvre.

II.3.8.1 - Appréciation de l'aléa de rupture

Les *aléas* de rupture seront appréciés en se fondant sur les conclusions d'une expertise qui visera à affecter à chaque tronçon de levée une classe d'aléa de rupture, selon le principe suivant :

- 0 - levée parfaitement sûre,
- 1 - levée moyennement sûre,
- 2 - levée à risque modéré,
- 3 - levée à haut risque.

L'aléa global d'un tronçon résulte de l'aléa le plus élevé parmi les aléas partiels liés aux différents mécanismes de rupture ou de dégradation (surverse, érosion côté Loire, érosion interne, instabilité mécanique, fontis...) identifiés par les phases précédentes de l'étude.

II.3.8.2 - Appréciation de la vulnérabilité

La *vulnérabilité* sera appréciée, à partir des critères suivants :

- occupation des sols (zone urbaine, périurbaine, industrielle, agricole...),
- importance de la population protégée,
- voies de communication menacées (routes, voies ferrées, canaux...).

et sera caractérisée par une classe de vulnérabilité :

- 1 - vulnérabilité faible,
- 2 - vulnérabilité moyenne,
- 3 - vulnérabilité forte,
- 4 - vulnérabilité très forte.

II.3.8.3 - Évaluation des risques et synthèse cartographique

L'évaluation du *risque* associé à un tronçon est le croisement de l'*aléa de rupture* du tronçon et de la *vulnérabilité* du val protégé. Le risque sera donc caractérisé par une note résultant du produit des notes d'aléas et de vulnérabilité. Ce nombre, compris entre 0 (risque négligeable) et 12 (risque majeur), permettra de comparer en termes de risque des situations diverses. Ainsi le même risque, caractérisé par la note 6, sera associé à un tronçon de levée présentant un haut aléa de rupture et protégeant un val à vulnérabilité moyenne et à un autre affecté d'un aléa modéré mais protégeant un val à vulnérabilité forte.

Une restitution cartographique, à l'échelle du 1/10 000, sera effectuée pour la synthèse de l'étude des risques affectant la levée. Cette restitution fera notamment ressortir :

- le découpage de la levée en tronçons homogènes,
- la caractérisation par tronçon de l'aléa de dysfonctionnement et de rupture,
- la vulnérabilité par zone des vals protégés,
- la classe de risque associée à chaque tronçon.

II.3.9 - Étude des solutions de confortement et autres dispositifs pour assurer la sécurité de la levée

II.3.9.1 - Objectif général

L'objectif général de la phase d'étude des solutions de confortement est d'aboutir à la conception, au stade A.P.S. (Avant-Projet Sommaire), de l'ensemble des ouvrages nécessaires à la mise en sécurité de la digue face à la situation de crue visée à l'article §I.4.1 du présent C.C.T.P.. Pour la définition du terme A.P.S., il est fait référence à la nomenclature de la Loi M.O.P. (Maîtrise d'Ouvrage Publique) du 12/07/1995 et de ses décrets d'application.

Un tel objectif impose au prestataire de l'étude :

- de parfaitement identifier et évaluer tous les mécanismes de dégradation ou de rupture susceptibles d'affecter la digue dans sa configuration actuelle : d'où la nécessité du diagnostic approfondi et pertinent, décrit dans les phases précédentes de la démarche d'étude préconisée par le présent C.C.T.P. ;
- d'inventorier, au niveau du principe, et de comparer entre elles, sous couvert d'un prédimensionnement, l'ensemble des solutions de confortement ou d'aménagement possibles pour pallier les déficiences potentielles de la levée ;
- de choisir, justifier suivant le critère technico-économique et chiffrer la (ou les) solution(s) préconisée(s), non sans avoir intégré toutes les contraintes de réalisation que celles-ci émanent de la maîtrise d'ouvrage (ex : restrictions d'emprise, phasage imposé par des contraintes budgétaires, etc.) ou d'éléments techniques relevés par le prestataire au préalable ou en cours d'étude.

II.3.9.2 - Éléments de justification, dimensionnement et optimisation des ouvrages

a) Éléments de choix entre les diverses solutions

Les travaux à préconiser sur la levée pourront consister en des confortements au sens traditionnel du terme (ex : recharge côté val, paroi moulée, protection en enrochements ...) et/ou en des aménagements destinés à modifier le fonctionnement de l'ensemble du dispositif de défense du val (ex : création ou modification d'un déversoir). On rappelle que, comme déjà signalé à l'article §II.3.6.1, les solutions envisagées pour le confortement pourront orienter la consistance d'une partie des reconnaissances géotechniques.

Dans tous les cas, il conviendra :

- d'évaluer la faisabilité des travaux de confortement pressentis : par exemple, la création d'une recharge côté val nécessite de disposer d'une emprise suffisante en pied de levée (ce qui ne sera pas le cas lorsque des constructions sont implantées dans, ou à proximité immédiate, du talus concerné) ;
- d'identifier les inconvénients ou répercussions diverses possibles : une recharge ou une protection côté fleuve réduit la section et/ou modifie les conditions d'écoulement en lit mineur et, en principe, est soumise à autorisation au titre de la Loi sur l'Eau ; de même, la création d'un masque ou d'un revêtement d'étanchéité côté fleuve introduit un risque d'instabilité mécanique à la décrue et/ou en conditions de fonctionnement inverse (niveau du fleuve plus bas que celui d'inondation du val) ; etc.

b) Dimensionnement des ouvrages

L'utilisation de modèles, hydrauliques ou géomécaniques, aura contribué à l'évaluation de la sécurité de la digue à l'état actuel (cf articles §II.3.4 et §II.3.7).

Comme mentionné dans les articles suscités, les mêmes outils seront mis en œuvre par le prestataire pour évaluer l'état conforté et ce, afin de comparer entre elles différentes options de confortement et d'optimiser leur dimensionnement.

c) Étude de matériaux de remblaiement

La plupart des engraisements ou recharges réalisés sur les digues de la Loire l'ont été avec des matériaux sableux non compactés, sans doute directement issus des alluvions récentes du fleuve. Or, les prélèvements en lit mineur étant maintenant en voie d'interdiction, les sources d'approvisionnement en matériaux utilisables pour la construction de remblais sur les digues sont susceptibles de se diversifier.

Dans ce contexte, le prestataire procédera, s'il préconise un volume important de remblais, à une première recherche, au stade faisabilité, des matériaux de remblaiement pouvant être approvisionnés sur un site donné, que ceux-ci proviennent de ballastière en lit majeur ou de carrière. En particulier, selon la fonction recherchée pour le confortement (étanchéité, renforcement mécanique, recharge de pied, etc.), il évaluera sommairement, au vu des courbes granulométriques disponibles chez les carriers, l'aptitude au compactage des dits matériaux en gardant à l'esprit qu'un remblai compacté présente des propriétés intéressantes : meilleure étanchéité et résistance mécanique améliorée (remblai plus dense, plus résistant au cisaillement mais aussi à l'érosion).

d) Traitement des points singuliers

Le prestataire prêter une grande attention au traitement des points ou ouvrages singuliers (traversées de canalisations ou de galerie, constructions dans le talus côté val, etc.), repérés lors du diagnostic et qui pourraient bien se révéler comme ceux pour lesquels l'aléa de rupture de la levée s'avère le plus fort.

Le traitement de tels points relève en général de travaux « spéciaux » qu'il aura à charge de définir et dont il étudiera le principe du raccordement avec les travaux « standard » préconisés de part et d'autre.

II.3.9.3 - Contraintes à prendre en compte dans l'étude des avant-projets

Lors de son étude des avant-projets de confortement, le prestataire sera tenu d'apprécier et de prendre en compte les contraintes listées ci-après.

a) Difficultés de réalisation et travaux provisoires

Il est impératif, au stade A.P.S., de ne pas sous-estimer les difficultés d'exécution. Cela pourrait être notamment le cas pour les travaux en conditions immergées, comme par exemple ceux de renforcement du pied de levée côté Loire en zone de contact direct avec le fleuve, ou pour des interventions en secteur d'emprise limitée, comme par exemple sur le talus côté val avec des bâtiments à proximité ou, encore, sur la crête lorsqu'elle est occupée par une voie de circulation importante. Il convient également - en particulier s'il était prévu des terrassements provisoires en déblai dans le corps de digue - de s'assurer que la sécurité de la digue en cours de travaux pourra être maintenue au moins à son niveau initial (avant travaux) ou, à défaut, que l'on disposera sur le chantier des moyens permettant de rétablir ce niveau de sécurité avant l'arrivée éventuelle d'une crue.

L'attention du prestataire de l'étude est donc attirée sur de telles contraintes d'exécution et il lui est demandé de tenir compte, dans l'évaluation des travaux de confortement, de tous les ouvrages provisoires et autres dispositions qui pourraient s'avérer nécessaires : batardeaux, soutènements ou remblaiements provisoires, déviation de la circulation, phasage particulier d'exécution, etc.

b) Phasage des travaux de confortement

[Compléter, amender ou préciser la rédaction du présent paragraphe suivant les instructions du maître d'ouvrage.]

Pour des raisons budgétaires relevant du maître d'ouvrage, le montant de la tranche de travaux de confortement programmables annuellement est limité à [...] F HT.

Dans ce cadre, le prestataire élaborera un plan de phasage des travaux en tranches opérationnelles, ne dépassant pas le montant visé ci-dessus. Lors de cette démarche, il intégrera l'ordre de priorité d'intervention résultant de l'étude de hiérarchisation des risques prévue à l'article §II.3.8 du présent C.C.T.P..

c) Contraintes de cohérence du projet de confortement

La cohérence de l'aménagement s'appréciera en observant les ouvrages de confortement projetés, non plus sur des profils en travers successifs, mais sur une vue générale en plan.

Tout d'abord, il faudra s'assurer de la compatibilité de l'aménagement projeté avec la configuration ou d'éventuels aménagements relatifs à la berge opposée (ceci est, de fait, obligatoire pour les travaux soumis à autorisation au titre de la Loi sur l'Eau).

En second lieu, il conviendra de s'assurer qu'à l'échelle de l'ensemble du secteur de digue à aménager, l'application de profils-type de confortement en fonction des situations successivement diagnostiquées ne se traduise par un «saucissonnage» excessif de la levée. Autrement dit, pour des raisons de facilité (et donc de coût) d'exécution et mis à part le cas particulier du traitement des points singuliers (se reporter à l'article §II.3.9.2.-d. ci-dessus), on privilégiera les solutions quelque peu «polyvalentes» pouvant être appliquées sans interruption sur des linéaires suffisamment longs.

Une autre contrainte à prendre en compte sera celle des dispositions techniques à prévoir pour assurer la continuité de la protection dans les zones de raccordement d'un type de confortement à l'autre.

d) Prise en compte des contraintes environnementales

Dans un souci de bonne intégration dans l'environnement, on cherchera à soigner l'esthétique des travaux sur la levée, en privilégiant le recours aux ouvrages en maçonnerie traditionnelle de pierres ou

ceux construits avec des éléments préfabriqués modernes qui permettent la croissance de la végétation herbacée (ex : dalles perforées de protection de berges, caissons engazonnables).

La mise en œuvre de techniques de protection végétale sera également possible pour les travaux de stabilisation des berges du lit, sous réserve, cependant, de ne pas risquer le développement de la végétation ligneuse sur le corps de digue ou à proximité de son pied (cela condamne a priori leur usage dans les zones de contact direct de la levée avec le fleuve) ou encore d'ouvrages en maçonnerie. En outre, il conviendra de vérifier, au cas par cas, l'adéquation de ces techniques végétales vis-à-vis des contraintes hydrauliques subies (cf article §II.3.4.2) et de s'assurer qu'un entretien régulier des ouvrages pourra être effectué.

Dans le même esprit de préservation de l'environnement, on minimisera autant que possible l'emprise des zones à réaménager : à ce titre, la préférence pourra être donnée aux solutions de confortement (d'ailleurs a priori plus économiques) qui ne portent que sur un seul des talus plutôt que sur les deux.

Enfin, les travaux devront être pensés dans le souci de limiter au maximum les impacts et nuisances en cours de chantier (mise en place de batardeaux, arrosage des pistes de chantier, etc.) et de prévoir les mesures compensatoires et/ou d'insertion nécessaires.

II.3.10 - Synthèse et élaboration du programme d'intervention

En conclusion de son étude, le prestataire établira un rapport de synthèse reprenant toutes les phases successives du travail réalisé et aboutissant au programme d'intervention qu'il préconise. L'ensemble des résultats et documents émanant de l'étude seront fournis dans les annexes du rapport.

Pour le programme d'intervention, on privilégiera une présentation sous forme de tableaux à lecture rapide où les travaux de confortement nécessaires seront rappelés par un libellé sommaire, en mentionnant leur coût respectif. Le prestataire s'attachera également à fournir des indications quant aux modalités et aux coûts d'entretien des ouvrages à construire.

ARTICLE II.4 - DISPOSITIONS APPLICABLES À CERTAINES NATURES DE TRAVAUX

II.4.1 - Prospection géophysique

II.4.1.1 - Préparation du terrain

Le prestataire effectuera à sa charge les travaux de préparation du terrain qui s'avéreront nécessaires à la bonne conduite des mesures de prospection géophysique : piquetages d'implantation et de repérage au sol, dégagement et/ou fauchage de la végétation sur les emprises, nivellement éventuel du terrain, etc.

II.4.1.2 - Prospection électromagnétique à émetteur/récepteur portable EM34

Le matériel à mettre en œuvre comprendra :

- l'appareil EM34 (Géonics ou équivalent) ;
- un enregistreur numérique type DL720 et logiciel de commande adéquat ;
- un ordinateur portable, et les logiciels adhoc, pour le transfert sur place des données enregistrées et pour un premier traitement graphique.

Le dispositif sera utilisé en profil longitudinal sur la crête et, tous les 2 km, sur un profil transversal de la digue, avec au minimum deux mesures (deux valeurs d'écartement de bobines) par station.

Les deux valeurs d'écartement de bobines (parmi 10, 20 et 40 m) et la valeur de la fréquence d'émission (6.4, 1.6 ou 0.4 Khz) seront choisies de façon à permettre l'investigation du corps de digue et de sa fondation. Le pas d'espacement des stations sera fixé afin d'assurer la continuité de la prospection dans le sens longitudinal.

Les dispositions précédentes seront consignées et justifiées par le prestataire dans une notice d'exécution à soumettre à l'agrément préalable du maître d'œuvre.

L'équipe de terrain sera constituée de 2 opérateurs expérimentés à la pratique de la mesure. Au cours de la prospection, les opérateurs veilleront à éviter, ou à défaut consigneront, les sources de perturbation électrique ou électromagnétique rencontrées : lignes électriques, émetteurs radio, clôtures ou constructions métalliques, etc.

Les résultats de la prospection seront rendus sous forme de tableaux des résultats bruts (abscisses, profondeurs, conductivité) et de graphiques (profils de conductivité apparente, coupes d'interprétation géotechnique). Sur ces documents, les abscisses du profil longitudinal seront rattachées au PK de référence défini à l'article §I.4.2.. Les graphiques seront conçus et présentés de façon à pouvoir être superposés aux radargrammes (cf article §II.4.1.3 ci-dessous). Enfin, le prestataire remettra une note descriptive et d'interprétation de la prospection EM34, en commentant les zones d'anomalies détectées.

II.4.1.3 - Prospection électromagnétique à réflectométrie radar

Le matériel à mettre en œuvre comprendra :

- deux blocs antenne émetteur/récepteur (SIR10, SIR2M, RAMAC ou équivalent) ;
- une centrale d'acquisition et de traitement ;
- une imprimante pour les enregistrements graphiques immédiats ;
- un ordinateur portable doté des logiciels de traitement appropriés.

Le dispositif sera utilisé en profil longitudinal sur la crête et, tous les 2 km, sur un profil transversal de la digue, avec, successivement, deux blocs antenne de fréquence différente, dont une en basse fréquence (autour de 100 Mhz) pour couvrir la profondeur maximale d'investigation.

Le choix des deux fréquences de travail et de la vitesse d'avancement résultera d'un compromis entre la nature prévisible du matériau de la digue, la profondeur d'investigation (jusqu'en sommet de fondation si possible) et la finesse des mesures.

Les dispositions précédentes seront consignées et justifiées par le prestataire dans une notice d'exécution à soumettre à l'agrément préalable du maître d'œuvre.

L'équipe de terrain sera constituée de 2 opérateurs expérimentés à la pratique de la mesure. Un dégagement de l'emprise et un marquage au sol (par « top » électronique) soignés seront préalablement effectués pour assurer la qualité des mesures (meilleur contact possible des blocs antenne avec le sol) et leur calage sur le profil en long. Le profil de mesures sera implanté en principe hors d'emprise de chaussée et les opérateurs veilleront à consigner les obstacles résiduels ou revêtements éventuellement rencontrés en surface au cours de la progression.

Les résultats de la prospection seront rendus sous la forme de radargrammes annotés des commentaires sur les observations de surface et l'interprétation des échos. Sur ces documents, les abscisses du

profil longitudinal seront rattachées au PK de référence défini à l'article §I.4.2.. Les radargrammes seront conçus et présentés de façon à pouvoir être superposés aux graphiques de profil de conductivité EM34 (cf article §II.4.1.2 ci-dessus). Enfin, le prestataire remettra une note descriptive et d'interprétation de la prospection par réflectométrie radar, en commentant les zones d'anomalies détectées.

*II.4.1.4 - Variante au dispositif de reconnaissance géophysique en continu
[Paragraphe à supprimer si le C.C.A.P. du marché n'autorise pas les variantes.]*

Toute variante au dispositif de base prévu au titre du présent marché ne pourra être mise en œuvre qu'après libre acceptation du procédé par le maître d'œuvre, sur présentation par le prestataire d'un dossier technique circonstancié. En cas de refus de la variante, le prestataire est tenu de mettre en œuvre le dispositif de base (EM 34 et radar) sans pouvoir prétendre à une quelconque indemnité.

Les associations d'appareils variantes ne seront a priori considérées que si elles répondent aux deux principes suivants :

- mettre en œuvre en parallèle, dans le sens longitudinal de la digue, deux méthodes au principe complémentaire et/ou ne mesurant pas le même paramètre ;
- privilégier les méthodes qui, en un seul passage (profil en long), ont une profondeur d'investigation a priori suffisante pour recouper la fondation de la digue.

II.4.2 - Forages

II.4.2.1 - Réalisation des forages carottés et prélèvements d'échantillons intacts

Le carottier utilisé, a priori de type poinçonneur, sera choisi de façon à permettre le prélèvement d'échantillons intacts (de classe 1, au sens de la norme P94-202), pour essais complets d'identification et de mécanique des sols en laboratoire. Il conviendra de s'assurer à tout moment du bon fonctionnement du carottier (état de la trousse coupante, propreté des surfaces intérieures,...). Pour le mode de prélèvement et le conditionnement des carottes, il sera fait application de la norme P94-202.

Les observations du foreur dépendant du prestataire, les références des prélèvements ainsi que tous les incidents de sondage - tels que pertes d'eau, chutes d'outils, etc... - seront consignés, par forage, en mentionnant les profondeurs, dans un calepin tenu à cet effet et mis à la disposition du représentant du maître d'œuvre. La présence d'un géotechnicien lors de l'exécution effective des forages est exigée.

Les carottes, de diamètre minimum 75 mm, seront soigneusement repérées (profondeur), placées dans des caisses en bois, décrites et photographiées par le prestataire. Les caisses seront étiquetées, transportées et stockées dans un local désigné par le maître d'œuvre.

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

II.4.2.2 - Réalisation des forages destructifs

Les forages destructifs seront effectués à l'outil de diamètre adapté (100 mm ou plus) pour permettre leur équipement avec un piézomètre. Il sera procédé au tubage provisoire des sondages partout où cela s'avérera nécessaire à la pose du piézomètre.

[Si nécessaire, compte tenu de la nature prévisible du sol (cf fiche-méthode « forages mécaniques »), imposer ci-dessus l'usage de la tarière mécanique : on peut alors compléter le paragraphe §II.3.6.2 a) en demandant des prélèvements d'échantillons remaniés et des essais d'identification dans le sondage destructif du bas de talus côté val et viser ici la norme P94-202 pour les modalités de prélèvement d'échantillons remaniés de classe 3.]

Ils feront l'objet d'un enregistrement en continu des paramètres de forage (diagraphie) : vitesse d'avancement, valeur du couple, pression sur l'outil, pression du fluide de forage, etc., selon le type de la foreuse employée (tarière, marteau fond de trou ou tricône).

Comme pour les forages carottés, toutes les informations relatives à leur exécution seront reportées dans le calepin de chantier, mis à la disposition du représentant du maître d'œuvre et la présence d'un géotechnicien lors de l'exécution effective des forages est exigée, notamment pour l'examen des cuttings.

II.4.2.3 - Équipement en piézomètre

Les tubes à mettre en place seront en PVC, de diamètre intérieur compris entre 20 et 30 mm, et fermés à l'aide d'un bouchon étanche. Les caractéristiques de crépinage devront être précisées.

Les têtes de tube seront scellées et levées en X,Y et Z (nivellement NGF), par rapport à un point de référence connu, afin d'être positionnées sur le plan topographique de la levée. Chaque tête sera équipée d'un boîtier de protection cadennassé dont les clés seront remises au maître d'œuvre à l'issue de l'étude.

II.4.2.4 - Documents à remettre après exécution

A l'issue du chantier de forages, le prestataire constituera un dossier spécifique d'exécution assorti notamment des documents suivants : diagraphies (et interprétation), logs des forages, calepins de sondage, descriptions et photos des carottes, données topométriques concernant les tubes et leur crépinage, report des points de forage sur le plan topographique.

Ce dossier sera joint au rapport global d'études remis par le prestataire.

ARTICLE II.5 - MODALITÉS DE RESTITUTION DE L'ÉTUDE

II.5.1 - Documents d'étape

L'achèvement de chaque phase d'étude telle que définie à l'article §II.3 ci-dessus, à l'exception de la dernière (article §II.3.10), donnera lieu à l'élaboration d'un rapport d'étape dressant notamment :

- la synthèse des résultats de la phase achevée, assortie de tous les documents produits ;
- l'inventaire des éléments à prendre en compte pour les phases suivantes de l'étude.

[Préciser dans le C.C.A.P. du marché, ou ici même, le nombre d'exemplaires à fournir pour les documents concernés.]

II.5.2 - Réunions intermédiaires

Des réunions intermédiaires pourront être organisées à l'initiative du maître d'ouvrage ou du prestataire de l'étude pour effectuer le point sur l'état d'avancement des travaux, en valider les conclusions partielles et/ou les documents d'étape et discuter des orientations pour la suite de l'étude.

Au minimum, une réunion intermédiaire est prévue à l'achèvement de la phase de reconnaissances géotechniques (cf article §II.3.6), soit au terme des phases comprenant l'essentiel des investigations de terrain. La participation du prestataire à cette réunion, ainsi qu'à toutes celles demandées par le maître d'ouvrage, est rémunérée par le poste [...] du bordereau des prix du marché.

[Prévoir dans le bordereau des prix le poste adhoc, par réunion, pour la participation du prestataire aux réunions intermédiaires organisées à l'initiative du maître d'ouvrage.]

Par contre, la participation aux réunions organisées à la demande du prestataire de l'étude ne donnent lieu à aucune rémunération de celui-ci.

II.5.3 - Rapport final

Il s'agit du document final à produire au titre de la dernière phase de l'étude « synthèse et élaboration du programme d'intervention » (cf article §II.3.10).

Le prestataire s'attachera à assortir ce rapport de tableaux et de documents graphiques synthétiques permettant une lecture facile et rapide. Il sera notamment fourni, par exemplaire du rapport, un tirage du plan topographique au 1/500, parfaitement légendé, avec report de l'implantation de l'ensemble des sondages et profils de mesures, effectués au titre de l'étude, ainsi que des désordres et singularités recensés.

La remise au maître d'ouvrage du rapport final s'effectuera à l'occasion d'une réunion de présentation où le prestataire exposera la synthèse des résultats de ses travaux.

[Préciser dans le C.C.A.P. du marché, ou ici même, le nombre d'exemplaires à fournir pour les documents concernés / prévoir dans le bordereau des prix un poste pour la participation du prestataire à la réunion de présentation ou indiquer que cette participation est comprise dans le prix global de l'étude.]

CHAPITRE III : DISPOSITIONS ET RESPONSABILITÉS DIVERSES

ARTICLE III.1 - ACCÈS AUX DIFFÉRENTS PARTIES DE LA LEVÉE - PROTECTION DES BIENS ET DES RÉSEAUX

La crête de digue et le talus côté fleuve sont la propriété du maître de l'ouvrage et le prestataire de l'étude en aura, donc, le libre accès sous réserve des dispositions particulières à prendre, suivant les directives des services gestionnaires, pour ce qui concerne les interventions sur les voies de circulation (route en crête de digue notamment).

Par contre, le pied de talus côté val, et parfois le talus lui-même, ont souvent été intégrés à des propriétés privées : si tel est le cas, les personnels relevant du prestataire et ayant à intervenir sur ces parties de l'ouvrage devront, au préalable, se présenter au propriétaire et solliciter l'autorisation de pénétrer sur son terrain.

[Si, comme c'est hautement recommandable, le maître d'ouvrage a adressé au préalable un courrier d'information à tous les riverains de la levée, le préciser à la fin du paragraphe précédent.]

Les éventuels terrassements d'aménagement des accès et circulations ou de préparation des plateformes de station pour les sondages géotechniques ou les mesures géophysiques seront à la charge exclusive du prestataire de l'étude, qui devra obtenir, auprès du propriétaire (qu'il soit public ou privé), toutes les autorisations nécessaires.

La réparation de tous les dégâts causés, du fait des travaux du prestataire, aux biens publics ou privés et, notamment, aux réseaux de distribution souterrains ou aériens sera effectuée aux frais ou à la charge du prestataire, sous le contrôle du concessionnaire ou du propriétaire du bien ou du réseau.

[Indiquer ci-dessus dans quels services les plans des réseaux de distribution peuvent être consultés / mentionner l'éventuelle existence de réseaux dangereux (ex : conduite souterraine de distribution de gaz ou électrique, lignes aériennes moyenne ou haute tension).]

ARTICLE III.2 - SIGNALISATION, SÉCURITÉ ET COORDINATION DES CHANTIERS

La signalisation, la sécurité et la coordination de tous les chantiers liés à l'étude sont placées sous la responsabilité exclusive du prestataire qui prendra toutes les dispositions réglementaires et nécessaires pour prévenir tout dommage tant envers les tiers qu'envers ses personnels ou ceux intervenant pour son compte.

L'attention du prestataire de l'étude est, notamment, attirée sur l'importance du trafic routier existant sur la voie de circulation de crête de digue. Le prestataire et/ou les entreprises intervenant pour son compte auront à charge, selon la phase de terrain en cours (levé topographique, inspection visuelle, prospection géophysique, travaux de forage, etc...) d'organiser la signalisation routière et la mise en place d'éventuelles déviations, avec l'accord et sous l'autorité des services gestionnaires de la voie.

[Préciser les références du (ou des) services gestionnaires des voies concernées / supprimer ou amender le paragraphe précédent s'il n'existe pas de voie en crête.]

En cas de travaux d'inspection subaquatique, le programme d'exécution établi par le prestataire et à soumettre à l'agrément préalable du maître d'œuvre comprendra une notice d'hygiène et de sécurité spécifique à ce chantier et stipulant : les références et qualités de l'entreprise exécutante, les dispositions d'encadrement et de sécurité adoptées en application de la réglementation sur les travaux en milieu hyperbare.

Enfin, la prestation, comprenant au moins une phase de travaux de génie civil (forages en particulier) où plusieurs entreprises sont susceptibles d'intervenir, est soumise aux dispositions réglementaires de coordination en matière de sécurité et de protection de la santé sur les chantiers de bâtiment et de génie civil (Code du Travail - Titre 3, circulaire DRT 96-5 du 10/04/96). Le coordonnateur de Sécurité et de Protection de la Santé (S.P.S.), désigné par le maître d'ouvrage, est : [...]. Le prestataire de l'étude établira, sous le contrôle du coordonnateur S.P.S. sus-désigné, le (ou les) Plan(s) Particulier(s) de Sécurité et de Protection de la Santé (P.P.S.P.S.) qui s'impose(nt).

[Paragraphe précédent à compléter/amender suivant le contexte : noter que si on restreint l'opération à l'étude sensu stricto, elle est a priori de catégorie 3 (< 500 hommes-jour) avec éventuels travaux dangereux (ex : subaquatiques) ; si, au contraire, on étend son champ aux futurs travaux de confortement, elle passe en catégorie 2.]

ARTICLE III.3 - PROPRIÉTÉ ET CONFIDENTIALITÉ DES RÉSULTATS

Le maître d'ouvrage est propriétaire à part entière des résultats de l'étude.

Le caractère strictement confidentiel des prestations réalisées au titre de l'étude est souligné et le prestataire sera tenu à ne divulguer aucune information pouvant porter préjudice à cette confidentialité.

Toute exploitation ou publication des résultats, par le prestataire, à d'autres fins que celles de l'étude devra obtenir l'accord préalable écrit du maître d'ouvrage.

ARTICLE III.4 - RESPONSABILITÉS DU PRESTATAIRE SUR LES RÉSULTATS DE L'ÉTUDE

Le prestataire prend, vis-à-vis du maître d'ouvrage, l'entière responsabilité de tous les résultats et conclusions de l'étude, y compris ceux issus, directement ou indirectement, des prestations, travaux, calculs, modélisations ou analyses réalisés par les co-traitants (entreprises groupées) ou sous-traitants agréés au titre du marché.

ANNEXES AU C.C.T.P.

- plan de situation du secteur de levée objet de l'étude
- modèle de fiche de relevé des désordres avec notice (visé à l'article §II.3.5.3 du C.C.T.P.)

ANNEXE AU CCTP-TYPE D'ÉTUDE DE DIAGNOSTIC DES LEVÉES DE LA LOIRE

Notice du document-type et recommandations pour la dévolution des études

1. NOTICE DU CCTP-TYPE

Des commentaires, adaptés au contexte et destinés à guider l'utilisateur du CCTP-type, sont dispersés au fil du texte : ils sont en caractères italiques et toujours encadrés de 2 crochets '[' et ']'. Ceci permet de les retrouver facilement avec la fonction « recherche » du traitement de texte et de les supprimer après lecture.

Pour la même raison, les champs ou zones à compléter par l'utilisateur sont systématiquement repérés par le symbole '[...]'. Par exemple : PK [...] au PK [...], Maître d'œuvre : [...], levée de Loire dite du [...].

Enfin, tous les numéros d'article mentionnés dans le texte sont précédés du caractère '\$' (ex : article §II.2 du CCTP). Ceci permet également de les retrouver facilement au cas où l'adaptation du CCTP, à partir de la trame-type, nécessiterait une modification de la numérotation des articles.

2. RECOMMANDATIONS POUR LA DÉVOLUTION DES ÉTUDES

2.1 MODALITÉS DE PASSATION DES MARCHÉS

Dans la majorité des cas, le montant de l'étude de diagnostic - dans sa version complète - dépassera le seuil dit des marchés publics (soit 300 000 F TTC) : aussi, le maître d'ouvrage étant public (État ou collectivité territoriale), la procédure de mise en concurrence doit se faire sous la forme d'un appel d'offres, en vue de la passation d'un marché de prestations intellectuelles : ce qui est d'ailleurs la pratique courante des services. La difficulté est que l'étude dans son ensemble concerne a priori plusieurs corps de métier : bureaux d'études en hydraulique, en géotechnique et/ou en géophysique, cabinets de topographie, entreprises de forage, etc.

Plusieurs modes de passation de marché sont envisageables et loin de nous l'idée d'imposer telle ou telle formule. Tout au plus, pouvons-nous fournir ici quelques pistes de réflexion.

L'appel d'offres doit-il être ouvert ou restreint ?

La formule restreinte est, de prime abord, attrayante puisqu'elle introduit une étape de présélection. L'inconvénient est que cette présélection ne se réalise que sur références des candidats, alors que ceux-ci n'ont pas eu communication du dossier et du détail des prestations à effectuer et n'ont donc pas forcément pu établir, en toute connaissance de cause, les groupements ou associations possibles entre prestataires.

A contrario, l'appel d'offres ouvert fait l'économie de l'étape de présélection (ce qui raccourcit d'autant le délai de la procédure de consultation) mais oblige le maître d'ouvrage à adresser un dossier à toutes les sociétés qui le demandent. La sélection risque, de fait, de porter sur un nombre important de soumissions.

Pour faciliter autant que faire se peut un tel travail de sélection, il est donc indispensable de dresser, dans le règlement de la consultation, une liste appropriée et exhaustive de critères de jugement des offres (cf § 2.3), convenablement hiérarchisés.

Cette simple, mais indispensable, précaution permettra, en principe, d'écarter «facilement» les soumissions des candidats non compétents vis-à-vis des domaines d'étude abordés.

Faut-il décomposer le marché en lots ?

La décomposition en lots revient, en définitive, à passer - au titre de la même opération - des marchés séparés, après appel d'offres sur l'ensemble du dossier. Cette formule permet de gérer, avec une relative souplesse, l'exécution des différentes prestations de l'étude : ce qui s'avère, de prime abord, intéressant dans la mesure où celles-ci font appel à des compétences distinctes et où, en outre, un ordre doit être respecté dans l'exécution des postes successifs. L'inconvénient majeur de la décomposition en lots réside dans le problème de la coordination et de la synthèse des travaux : si l'un des prestataires, adjudicataire d'au moins un lot, ne s'en voit pas explicitement confier la tâche, celle-ci risque de retomber sur le maître d'ouvrage ... avec toutes les difficultés que l'on imagine.

Le choix d'une formule à lot unique permet, en principe, au maître d'ouvrage de n'avoir qu'un seul interlocuteur, «responsable» de la coordination et de la bonne marche de l'ensemble des travaux. Dans un tel cadre, une attention toute particulière doit alors être apportée à la rédaction des dispositions du marché relatives aux modalités de co-traitance et de sous-traitance (solidarité entre entreprises groupées, acceptation et rémunération des sous-traitants, etc.).

Faut-il laisser au candidat la possibilité de présenter des variantes ?

La réponse est a priori oui, dans la mesure où rien, tout d'abord, n'oblige le maître d'ouvrage à les accepter. Une telle disposition est, en outre, intéressante pour les postes d'étude dont le contenu, en solution de base, résulte d'un compromis : par exemple, la prospection géophysique à propos de laquelle un candidat pourrait proposer d'autres formules d'association d'appareils.

Il convient, cependant, de mentionner les postes qui peuvent faire l'objet de propositions de variante et de demander au candidat de justifier techniquement, dans son mémoire, l'intérêt des solutions variantes envisagées.

2.2 PIÈCES GÉNÉRALES APPLICABLES

Les pièces applicables au marché doivent être mentionnées dans le Cahier des Clauses Administratives Particulières (C.C.A.P.).

S'agissant d'un marché public, on doit faire référence à un (et un seul) Cahier des Clauses Administratives Générales (C.C.A.G.) : au vu de la nature globale des prestations, il convient de mentionner le C.C.A.G.-Prestations Intellectuelles (P.I.).

Cependant, certaines prestations de l'étude relevant du domaine des travaux (ex : exécution des forages), il est recommandé d'inclure dans le C.C.A.P., si nécessaire, certaines clauses pertinentes du C.C.A.G. Travaux (sans omettre de récapituler les dérogations au C.C.A.G.-P.I. ainsi éventuellement introduites).

2.3 CRITÈRES DE JUGEMENTS DES OFFRES

Avant de définir des critères de jugement des offres, il faut s'assurer que la soumission du candidat contiendra de quoi les faire jouer. Il convient donc d'exiger du soumissionnaire, dans le règlement de la consultation, la fourniture d'un mémoire justificatif des dispositions qu'il se propose d'adopter pour l'exécution des prestations et abordant ou justifiant, notamment, les points suivants :

- programme et planning prévisionnels d'exécution de l'ensemble de l'étude et de ses différentes phases ;
- compétences, références et C.V. des différents intervenants (sociétés et personnels) ;
- matériels et moyens techniques envisagés par poste d'étude (géomorphologie/ hydraulique, forages, géotechnique, géophysique, modélisation et calculs, etc.) ;
- fourniture des sous-détails de prix par poste ;
- dispositions en matière de sécurité des chantiers ;
- dispositions d'assurance qualité ;
- modalités et formes particulières de restitution des études (rapports intermédiaires et final, documents informatiques et cartographiques, etc.) ;
- responsabilités et modalités de coordination des études.

La non-fourniture du mémoire justificatif doit constituer un motif de rejet pur et simple de l'offre.

Dès lors, on peut dresser une liste de critères retenus dans le jugement des offres (en application du Code des Marchés Publics) et classés par ordre de priorité décroissant. Une formulation possible est la suivante :

- 1) la valeur technique de la méthodologie et des prestations proposées ;
- 2) l'adéquation des moyens proposés (humains, matériels et logiciels) avec les objectifs et le programme d'exécution de l'étude ;
- 3) le sous-détail des prix par poste ;
- 4) le prix de l'ensemble de l'étude ...

... en précisant que les trois premiers critères seront appréciés à la lumière d'une analyse approfondie, par la commission d'ouverture des plis, du mémoire justificatif joint à la soumission du candidat.

2.4 MODALITÉS DE RÉMUNÉRATION DU MARCHÉ

La question essentielle réside dans le choix entre une rémunération par forfait ou sur bordereau des prix unitaires.

Le marché à forfait n'est à notre sens pas recommandable en ce sens qu'il rigidifie les quantités respectives des prestations, alors que l'on souhaiterait plutôt bénéficier d'une grande souplesse afin de pouvoir éventuellement adapter le contenu de l'étude au fur et à mesure des résultats qu'elle produit.

Il nous semble donc opportun de poursuivre la pratique actuelle des services : à savoir, le recours au marché sur bordereau des prix unitaires. A ce titre, on a intérêt à établir un bordereau des prix le plus large possible (en termes de nombre et de nature de postes décrits) de manière à pouvoir y faire référence quelles que soient les situations rencontrées.

2.5 RÉUNIONS DE VALIDATION DU (DES) RAPPORT(S) INTERMÉDIAIRE(S)

Les pièces particulières du marché prévoiront, enfin, la tenue d'au moins une réunion de validation sur présentation, par le prestataire, d'un rapport intermédiaire. Une telle réunion permet de maintenir le contact entre le prestataire et le maître d'ouvrage au cours des travaux. Pour le maître d'ouvrage, elle fournit, en outre, l'occasion d'effectuer un point de contrôle de l'état d'avancement de l'étude vis-à-vis du délai d'exécution et de ses objectifs.

Chapitre 8

Dossier-type de description des levées

RECONNAISSANCE VISUELLE INITIALE : FICHE DE RELEVÉ DES DÉSORDRES NOTICE D'UTILISATION

DOCUMENT CARTOGRAPHIQUE DISPONIBLE :

- plan au 1/500 (ou 1/1 000) de l'ensemble du secteur de digue à reconnaître.

PRINCIPE DE MISE EN ŒUVRE

La description s'opère à pied par sections élémentaires de longueur (en principe fixe) prédéterminée, calées sur un PK existant et matérialisées provisoirement sur le terrain par au moins l'un des opérateurs (topofil ou mètre-ruban et jalons).

La surface de la digue à décrire est divisée, par convention, en 3 parties :

- talus et pied de levée côté val ;
- crête (y compris banquettes ou murette de revanche/réhausse) ;
- talus et pied de levée côté fleuve.

Pour chaque partie de digue comprise dans une section élémentaire, les désordres et informations sur la constitution de l'ouvrage sont symbolisés sur le plan (à l'échelle dans toute la mesure du possible), au fur et à mesure de leur observation, avec un numéro compris entre 1 et 10 renvoyant à une ligne de la fiche de relevé.

OBJECTIF DE LA FICHE

Fournir, en complément des indications graphiques et des légendes directement portées sur le plan, des informations codées et alphanumériques (commentaires) qui pourront être stockées dans une base de données (à terme probablement géographique) et exploitées par des outils d'analyse de données, le tout dans un format d'archivage commun à l'ensemble des levées de la Loire.

MATÉRIEL À EMPORTER

- un tirage du plan au 1/500 (avec sections repérées) et la carte I.G.N. au 1/25 000 ;
- un topofil (ou un mètre-ruban de 50 mètres) ;
- un clisimètre et une boussole de poche ;
- une serpe(*), un marqueur(*) et une bombe de peinture ;
- un pic de géologue, une pelle U.S., un feutre à essence et des sachets à échantillons ;
- un mètre de poche(*) et un mètre-ruban (50 mètres ou, à défaut, 20 mètres) ;
- un appareil photographique réflex 24x36 et, éventuellement, un Polaroid ;
- une planchette avec crayon et gomme(*) ;
- une demi-douzaine de jalons ;
- le jeu préparé de fiches de relevé de désordres ;
- en option : une tarière manuelle ;
- en option (version informatisée de la fiche) : un micro-ordinateur portable.

(*) à un raison d'un jeu ou appareil par opérateur

NOMBRE D'OPÉRATEURS

- 3 (recommandé) ou 2 (à la rigueur).

TRAVAIL PRÉPARATOIRE

- Reconnaissance préalable rapide (en voiture) du secteur de digue ;
- Étude documentaire et interview des gestionnaires ;
- Choix de la longueur de la section élémentaire, du réseau PK de référence, d'un point de départ à PK connu, d'un sens de parcours et du mode d'organisation de l'équipe de terrain ;
- Report sur le plan au 1/500, et repérage PK, des limites des sections élémentaires. Inventaire des points de recalage a priori exploitables sur le terrain ;
- Pré-remplissage des fiches : cadres d'en-tête et informations PK de repérage général des sections.

COMMENTAIRES POUR LE REMPLISSAGE DE LA FICHE

ORGANISATION GÉNÉRALE DE LA FICHE :

Une fiche permet de décrire les trois parties d'une section élémentaire de digue : partie côté val, crête, partie côté fleuve. Les deux cadres d'en-tête contiennent des informations générales et de repérage relatives à la section élémentaire, considérée dans son ensemble. Le corps de la fiche est divisé en 3 cadres se rapportant respectivement aux 3 parties de la levée définies ci-dessus. Les cadres de pied de page de la fiche sont constitués de tables aide-mémoire pour la codification à employer.

INFORMATIONS D'EN-TÊTE :

A remplir, en principe et à l'exception des champs «Date» et «Opérateurs», avant le déplacement sur le terrain ;

- Date : date du jour ;
- Commune : nom de la commune de situation de la section élémentaire ;
- Opérateurs : nom des intervenants, avec en premier le nom du rédacteur de la fiche ;
- Lieu-dit : nom du lieu-dit, le plus proche de la section, porté sur la carte IGN 1/25 000 ;
- Réf PKa : référence en clair du PK de base utilisé pour le repérage longitudinal (ex : PK de la route nationale xx) ;
- Réf PKb : référence (éventuelle) d'un PK supplémentaire pouvant être utilisé pour le repérage longitudinal ;
- Lg section : longueur (en mètres) de la section décrite. Celle-ci correspond, sauf cas particulier, à une longueur fixe de section élémentaire, prédéterminée préalablement au bureau pour l'ensemble d'un secteur de digue à reconnaître. Si, à la reconnaissance rapide préalable, la digue apparaît

très hétérogène, mal dégagée (manque de visibilité du fait de la végétation) et/ou semble le siège de nombreux désordres, on optera pour une longueur de section réduite (20 à 25 m). Dans le cas contraire, on pourra retenir 50 m, voire 100 m ;

- val : nom du val protégé par la levée.

CADRE REPÉRAGE GÉNÉRAL (DE LA SECTION DÉCRITE) :

- PKa : coordonnée kilométrique, selon le PK de base utilisé pour le repérage longitudinal, du point de début de la section. Ce champ est pré-rempli au bureau au moment de la délimitation des sections élémentaires. Dans tous les cas, le PKa de la section «n» est égal au PKa de la section «n-1» additionné de la longueur (Lg_section) de la même section «n-1» ;
- PM déb : indication métrique du point de début de la section, fournie par l'appareil de repérage de terrain (topofil ou mètre-ruban) ;
- PM fin : indication métrique du point de fin de la section, fournie par l'appareil de repérage de terrain (topofil ou mètre-ruban) ;

En principe, $PM_{fin} = PM_{déb} + Lg_{section}$. Cependant, si un point de recalage par rapport au PK de base est exploité le long de la section décrite, le point métrique de fin est déplacé, si nécessaire, de façon à rétablir sa parfaite concordance avec le repérage PK. Enfin, si l'appareil de repérage sur le terrain (topofil) n'est pas réinitialisé, le PM déb de la section «n» est pris égal au PM fin de la section «n-1» ;

- PKb : facultatif, idem PKa pour le PK supplémentaire éventuellement utilisé.

CADRES DE DESCRIPTION DES DÉSORDRES ET DES OBSERVATIONS PAR PARTIE DE LEVÉE :

Le corps de la fiche est divisé en 3 cadres se rapportant respectivement aux 3 parties de la levée : talus et pied de digue côté val (code : Pval), crête y compris dispositif de revanche/réhausse (code : Cret), talus et pied de digue côté fleuve (code : Pflv). La structure générale des cadres est identique d'une partie de levée à l'autre : seuls les codes «désordre» et «élément d'ouvrage» peuvent être différents (ex : le code «niveau de crue» [NVC] ne peut s'appliquer que sur la partie au fleuve, l'élément d'ouvrage «dispositif de revanche» [RVH] n'existe que pour la crête).

Repérage/description des désordres :

Pour chacune des 3 parties de la levée, on dispose, dans les 3/4 gauche du cadre correspondant, de 10 lignes, numérotées de 1 à 10, pour saisir autant (d'indices) de désordres ou de singularités :

- Référ déso : numéro, compris entre 1 et 10, qui renvoie au même numéro porté sur le plan au 1/500, dans la zone de digue concernée. S'il y a plus de 10 désordres à saisir pour l'une des parties de la section, il convient d'utiliser une deuxième fiche en reprenant la numérotation à partir de 11. Sur le plan lui-même, l'information est, si possible, symbolisée (au moyen d'une légende normalisée) et/ou dessinée à l'échelle ;
- Code déso : code alphanumérique à 3 caractères décrivant la nature du désordre (de l'indice ou de la singularité). Ce code renvoie à une table aide-mémoire située en pied de page.

Certains codes ne s'appliquent qu'à une partie spécifique de la digue (ex : NVC/NVE, pour laisse de crue/niveau d'eau, utilisable que pour le talus au fleuve). D'autres codes «désordres» visent plus particulièrement les ouvrages rigides, maçonnés (en pierres maçonnées ou en béton) pour l'essentiel (ex : DEJ pour déjointoiement, DES pour déstructuration, etc. - cf. table correspondante). Quatre codes spéciaux peuvent, en outre, être utilisés ici pour repérer des éléments particuliers relevés ou exécutés lors de la visite et qui ne sont pas des désordres : PZO pour un piézomètre, SDG pour un sondage, PRV pour un prélèvement de matériau de la digue (indiquer la profondeur et une éventuelle référence) et PFT pour un profil en travers (en préciser la justification) ;

- **Code ouvr.** : code alphanumérique à 3 caractères qui permet d'indiquer, si possible, l'élément d'ouvrage de la digue affecté par le désordre décrit. Ex : le code «ouvrage» [RVT] associé au code «désordre» [FIS] mentionne une fissure sur le revêtement de protection ;

- **Nb** : nombre de désordres décrits au titre du numéro de référence. Si le nombre est plus grand que 1, il s'agit d'un ensemble de désordres (ex : terriers), soit regroupés sur une zone restreinte (Rep. lg. ≠ vide), soit répartis sur toute la longueur de la section (Rep. lg. = vide) ;

- **Rep. lg.** : valeur métrique de repérage longitudinal, comprise en valeur absolue entre 0 (minimum) et la valeur de PM_fin - PM_déb (maximum), du désordre (Nb=1) ou du «centre de gravité» du groupe de désordres (Nb≠1). Une valeur positive (resp. négative) indique que la distance a été mesurée dans le sens (resp. sens contraire) de la progression, à partir du point de début (resp. de fin) de section. Le champ laissé vide signifie que le désordre se remarque, ou s'étend, sur toute la longueur de la section ;

- **PKa (calc)** : point kilométrique de repérage du désordre, selon le réseau de référence PKa, calculé au bureau ou par le système informatique (si Rep. lg. ≠ vide), en tenant compte de la correction éventuelle de repérage métrique issue d'un recalage PK.

Par exemple, si une erreur de mesure du repérage longitudinal peut être entièrement attribuée à la dernière section parcourue, le calcul du PKa du désordre se formule comme suit (avec Rep. lg. > 0) :

$$PKa[\text{désordre}] = Pka[\text{section}] + \text{Rep. lg.}[\text{désordre}] / 1000 * (1 + (PM_fin - PM_déb - Lg_section) / Lg_section))$$

Dans le cas contraire, le décalage constaté doit être réparti sur plusieurs sections successives par l'application d'une formule appropriée.

Les informations relatives au repérage transversal (3 colonnes successives) sont facultatives et ne sont remplies que si le positionnement du désordre sur le plan est incertain (dans le cas contraire, ces informations pourront être saisies au bureau en les mesurant directement sur le plan) :

- **Origine** : point d'origine de mesure de la distance transversale, en toutes lettres ou codé sur 3 caractères alphanumériques : par exemple, le pied de levée [PLF] ou le bord de crête côté fleuve [BCF], ou les deux mêmes points côté val [PLV et BCF] ;

- **Dist(m)** : distance inclinée en mètres, mesurée transversalement par rapport à l'axe longitudinal de la digue, entre le point origine et le désordre à repérer. Par convention, on pourrait adopter une valeur positive lorsque le sens de mesure est gauche-droite en se plaçant dans la direction d'écoulement du fleuve (dos de l'observateur tourné vers l'amont), négative dans le cas contraire ;

• Pente : tangente de l'angle, mesuré au clisimètre, d'inclinaison de la distance Dist ;
Une autre possibilité consiste à utiliser un repérage relatif et qualitatif du type : haut de talus, milieu de talus, bas de talus, pied de talus, au delà du pied de talus; bordure de crête côté fleuve, vers milieu de crête, bordure de crête côté val ;

• Champs Photo :

On indique, dans la colonne Nb, le nombre de photos (de détail) prises sur le désordre référencé et, dans la colonne No, le(s) numéro(s) de photo, sous la forme «nb1-nb2» s'il y en a eu plusieurs ;

• Description du(des) désordres : zone de commentaire libre pour toute information utile pouvant préciser la nature, l'étendue, la localisation ou les caractéristiques du désordre ;

• Cod grav : notation subjective de la gravité du désordre, appréciée localement (c'est à dire au plan de la sécurité de l'élément d'ouvrage affecté ... et non de celle de l'ensemble de la digue) :
- code 1 : amorce de désordre, désordre peu prononcé et/ou rare ;
- code 2 : désordre prononcé et/ou assez fréquent ;
- code 3 : désordre très prononcé et/ou omniprésent.

ex : une note 1 attribuée à un désordre [MVT] (local ou général) affectant un mur de revanche [RVH] pourrait traduire un début de basculement de ce mur; une note 3 attribuée à des terriers [TER] répartis sur l'ensemble d'un talus [TAL] pourrait indiquer une très forte densité de débouchés de galerie.

Observations sur l'ensemble de la (partie de) section :

L'extrémité droite du cadre de description de chacune des 3 parties de digue contient des informations qui se rapportent à l'ensemble de la section longitudinale, pour la partie concernée.

• Les 5 ou 6 (selon le cas) premières lignes servent à signaler la présence ou non (code O/N/I pour Oui/Non/Incertain) d'ouvrages annexes longitudinaux. La liste proposée comprend les principaux types d'ouvrage que l'on peut rencontrer sur telle ou telle partie de digue : RVT pour revêtement de protection sur le talus côté val ou côté fleuve, RVH pour dispositif de revanche sur la crête, etc.). On mentionne, ensuite (champ : *Précisions sur nature d'ouvrage*), pour les dispositifs existants, des compléments d'information sur leur nature et leur localisation (par exemple : s'ils ne couvrent pas toute la longueur de la section) ;

• Le champ Accès permet, par la mention O/N/I, d'indiquer s'il existe un accès pour les engins mécaniques en pied de digue (pour les deux parties sur talus, Pval ou Pflv) ou en crête, selon le cas ;

• Le cadre Photo d'ensemble est utilisé pour référencer une prise de vue générale prise de la partie de digue concernée :

- Rep. lg.(m) : indication métrique (topofil ou mètre-ruban) du point de station du photographe ;

- Amont < > Aval : rayer le symbole inutile (< ou >) pour indiquer le sens de la prise de vue (amont => aval ou aval => amont) ;

- Numéro : numéro de la photo, lu sur l'appareil ;

- La zone Comment. (pour commentaires) permet de formuler des appréciations générales sur toute (la partie de) la section de la digue et de mentionner d'éventuels points particuliers à propos de la visite : par exemple, témoignage et coordonnées de riverain rencontré, etc.

TABLES DES CODES ET GLOSSAIRE**- Codes de désordre - toutes parties de digue :**

- **CAN** : débouché de CANalisation, passage busé, dalot ou ouvrages annexes associés (ex : regard) ;
- **ERD** : Erosion longitudinale Diverse, autre que celle due au fleuve (ex : entaille du pied de digue par l'emprise d'un chemin ou d'une plateforme, «marche d'escalier») ;
- **FIS** : FISsure dans le terrain ou sur une structure rigide ;
- **FON** : FONtis, indice d'activité karstique (infiltration) ;
- **MVT** : affaissement, tassement, glissement, tout indice de MouVemenT du terrain ou d'une structure rigide (y/c basculement d'un mur ou d'un rideau de palplanches) ;
- **OSG** : Ouvrage SinGulier autre que canalisation (ex : construction, cave, mur dans le corps de digue, ouverture/porte dans la murette de rehausse) ;
- **RAV** : indice de RAVinement sur talus ou plate-forme (a priori dans le sens transversal) ;
- **TER** : débouché de TERrier ou galerie d'animaux fouisseurs ;
- **VEG** : présence de VEGétation arbustive et/ou arborescente, ou de souches.

- Codes de désordre - partie côté val :

- **DEP** : DÉPression, étang, zone d'emprunt (au delà du pied de digue) ;
- **IFU** : Indice de FUite (ex : zone humide, laisse de fuite après une crue).

- Codes de désordre - partie côté fleuve :

- **ERF** : ÉRosion (longitudinale) due au Fleuve ;
- **NVC** : NiVeau / laisse de Crue ;
- **NVE** : NiVeau d'Eau (du fleuve), à repérer systématiquement le jour de la reconnaissance lorsque le fleuve baigne le pied ou le talus de la levée ;
- **PLI** : Proximité du LIt mineur (talus ou pied de levée à moins de 20 m du lit).

- Codes de désordre - sur ouvrages maçonnés ou rigides annexes :

- **ALT** : ALTération des pierres ou du béton d'un ouvrage de maçonnerie, corrosion d'un ouvrage métallique ;
- **DEC** : DÉCollement, dissociation, mauvais contact entre 2 éléments d'ouvrage de nature différente (ex : décollement entre murette de revanche et son assise sur la digue) ;
- **DEJ** : DÉjointoiement, pierres enlevées sur maçonnerie ;
- **DES** : DEStructuration d'un ouvrage (au sens de désordre affectant la structure : effondrement, démantèlement, ...).

- Codes de désordre spéciaux :

- **PFT** : ProFil en Travers dressé lors de la visite (à ne saisir qu'une seule fois dans le cadre correspondant à la partie de digue où une observation particulière a motivé le levé du profil, indiquer dans le champ «description» le motif du levé) ;
- **PRV** : PRélèvement de matériau de la digue effectué lors de la visite de reconnaissance (à repérer comme un désordre sur la partie de digue concernée, indiquer dans le champ «description» le motif et la profondeur du prélèvement ainsi que le numéro du sachet où l'échantillon a été conditionné) ;
- **PZO** : tête de PiéZOmètre découverte ou observée lors de la visite (à repérer comme un désordre sur la partie de digue concernée) ;

- **SDG** : SonDaGe (en principe, à la tarière manuelle) effectué dans la digue au cours de la visite (à repérer comme un désordre sur la partie de digue concernée, indiquer dans le champ «description» le motif et la profondeur du sondage ainsi que la référence de la coupe géologique).

- *Codes (éléments d') ouvrages :*

Ces codes sont utilisés, soit pour indiquer quel élément d'ouvrage de la digue est affecté par le désordre saisi (cadre de description des désordres), soit pour signaler l'existence ou l'absence de cet élément d'ouvrage sur la partie de digue décrite (cadre d'observations d'ensemble). Il s'agit, en principe, d'ouvrages longitudinaux, c'est à dire dont la plus grande longueur est parallèle à l'axe de la levée :

- **CHE** : CHEmin de service, en pied de talus ou en crête ;
- **FOS** : FOSsé (ou contre-fossé) côté val en pied de digue ;
- **MUR** : MUR de soutènement, sur un talus de la levée ;
- **PPI** : Protection du PIed de la levée (massif en enrochements, risberme en terre, rideau de palplanches ou de pieux), en principe côté fleuve ;
- **RCH** : ReCHarge ou engraissement du talus de la levée, côté val ou côté fleuve ;
- **RTE** : RouTE (chaussée goudronnée), en crête ;
- **RVH** : ouvrage de ReVancHe ou de rehausse en bordure de crête, banquette (en terre) ou murette (en pierres maçonnées ou en béton, selon le cas) ;
- **RVT** : ReVêTement de protection du talus de la levée (pierres maçonnées, béton, ou éléments préfabriqués) ;
- **TAL** : TALus (non revêtu) de la levée, côté val ou côté fleuve.

- *Code AUT :*

Partout, pour autres ou divers.

Pièces associées (cf. pages suivante)

1 fiche vierge (tableau Excel)

2 exemples de fiche remplie (levée du Val de l'Authion)

RECONNAISSANCE VISUELLE INITIALE DES LEVEES / fiche b										Opérateurs:		Réf PKa :		Lg_section(m):			
Date :										Commune :		Lieu-dit :		Réf PKb :		Val :	
Repérage général										PKa :		PM déb :		PM fin :		PKb :	
Réf. déso.	Code déso.	Code ouvr.	Nb	Rep. lq (m)	PKa (calc)	Repérage transversal			Photo		Description du(des) désordre(s)	code grav.	Observations d'ensemble : ouvrages lq / accès / photo				
						Origine	Dist(m)	Pente	Nb	No			Code	O/N/I	Précision(s) sur nature d'ouvrage		
Partie côté Val (Pval)	1												RCH				
	2												MUR				
	3												FOS				
	4												CHE				
	5												RVT				
	6												AUT				
	7												Accès:	Photo	Rep.lq (m)	Direction	Numéro
	8												Comment.:	d'ensemble		Amont<->Aval	
	9																
	10																
Crête (Cret)	1													Observations d'ensemble : ouvrages lq / accès / photo			
	2													Précision(s) sur nature d'ouvrage			
	3												RTE				
	4												CHE				
	5												RVH				
	6												RVT				
	7												AUT				
	8												Accès:	Photo	Rep.lq (m)	Direction	Numéro
	9												Comment.:	d'ensemble		Amont<->Aval	
	10																
Partie côté Fleuve (Pflv)	1													Observations d'ensemble : ouvrages lq / accès / photo			
	2													Précision(s) sur nature d'ouvrage			
	3												PPI				
	4												RVT				
	5												CHE				
	6												MUR				
	7												RCH				
	8												AUT				
	9												Accès:	Photo	Rep.lq (m)	Direction	Numéro
	10												Comment.:	d'ensemble		Amont<->Aval	
Table des codes de désordre	Toutes par-ties :	VEG:Végétation	MVT:Affaiblissement	FIS:Fissure	Partie côté Val :	DEP:Dépression/Etang	IFU:Indice de fuite	Désordres s/ouvrage	DEJ:Déjointoyage/Pierres enlevées	Partout :							
	RAV:Ravinement	CAN:Canalisation/Passage busé	FON:Fontis	Partie côté fleuve :	ERF:Erosion par le fleuve	NVC / NVE:Niveau de crue / d'eau	ALT:Altération(pier.)	DES:Déstructuration	AUT :								
	OSG:Ouvr. singul.	ERD:Erosion long diverse/Entaille	TER:Terrier		PLI:Proximité du lit mineur		DEC:Décollement/Mouvement différentiel	autres(s)									
Codes (ell) d'ouvrage	RCH:Recharge/Engraisement	RTE:Route	MUR:de soutènement	PPI:Protection de pied (enrochements, palplanches, nsberme)	Codes "désordres" spéciaux :	PRV:Prélèvement	PZO:piézomètre										
	RVH:Ouvrage de revanche	CHE:Chemin (de service)	FOS:(contre-)fossé	RVT:Revêtement (de protection)	TAL:Talus	PFT:Profil en travers	SDG:sondage										

Fiche vierge.

RECONNAISSANCE VISUELLE INITIALE DES LEVEES / fiche b										Opérateurs: FLECHARD / DURAND / MERIAUX				Réf PKa : plan Cab. MARCHAND		Lg_section(m): 50					
Date :		Commune : VARENNES / LOIRE				Lieu-dit : Limite avec Indre-et-Loire				Réf PKb :		Val : Authion									
Repérage général		PKa : de P1 à P2					PM_déb : 0			PM_fin : 50		PKb :									
Réf. déso	Code déso	Code ouvr.	Nb	Rep. lg (m)	PKa (calc)	Repérage transversal			Photo		Description du(des) désordre(s)				cod grav	Observations d'ensemble : ouvrages lg /accès/photo					
						Origine	Dist(m)	Pent	Nb	No						Code	O/N/I	Précision(s) sur nature d'ouvrage			
Partie côté Val (Pval)	1	DEP	/	1	-22	PLV	7,5	0			Indiquée sur le plan - Pas d'eau, ni d'humidité visible				1	RCH	N				
	2	VEG	/	4	25	PLV	1	0			En pied de talus : anciennes souches				1	MUR	N				
	3															FOS	N	Fossé un peu au-delà, dans le champ			
	4															CHE	N				
	5															RVT	N				
	6															AUT					
	7																				
	8															Accès:	O	Photo	Rep.lg(m)	Direction	Numéro
	9															Comment:	d'ensemble ? ? 13				
	10															Talus propre - Clôture en pied					
															Accès facile par la rue du Saut						
Crête (Cret)	1	MVT	RTE	1	/	BCV	0	0			Accotement de la route étroit et instable				1	RTE	O				
	2	DES	RVH	1	-5,5	BCF	0	0	1	12	Zone déjointoyée et en début de destructuration				2	CHE	N				
	3	DEJ	RVH	1	/	BCF	0	0			Pierres manquantes - Etat général moyen				1	RVH	O	en pierres maçonnées			
	4															RVT	N				
	5															AUT					
	6																				
	7														Accès:	O	Photo	Rep.lg(m)	Direction	Numéro	
	8															Comment:	d'ensemble ? ? 11				
	9																				
	10																				
Partie côté Fleuve (Pflv)	1	VEG	/	5	/	PLF	0	0			Souches d'arbres récemment abattus, en pied du talus				1	PPI	I				
	2	VEG	/	n	/	PLF	-5	0			Ligne de jeunes peupliers, à moins de 7 m du pied de talus				1	RVT	I	signalé dans les archives, mais non visible			
	3															CHE	N				
	4															MUR	N				
	5															RCH	N				
	6															AUT					
	7																				
	8															Accès:	O	Photo	Rep.lg(m)	Direction	Numéro
	9														Comment:	d'ensemble ? ? 10					
	10														Talus propre						
															Accès a priori facile par le champ						
Table des codes de désordre	Toutes VEG:Végétation		MVT:Affaïssi/Tasst/Gliss/Bascut		FIS:Fissure		Partie côté Val: DEP: Dépression/Etang		IFU:Indice de fute		Désordres		DEJ:Dejointoyage/Pierres enlevées		Partout :						
	par- RAV:Ravinement		CAN:Canalisation/Passage busé		FON:Fontis		Partie côté		ERF: Erosion par le fleuve		NVC / NVE:Niveau s/ouvrage		ALT:Altération(pier.)		DES:Déstructuration		AUT :				
	ties : OSG:Ouvr. singul		ERD:Erosion long diverse/Entaille		TER:Terrier		fleuve :		PLI:Proximité du lit mineur		de crue /d'eau		mac/anx :		DEC:Décollement/Mouvement différentiel		autres(s)				
Codes (éit) d'ouvrage	RCH:Recharge/Engraissement		RTE:Route		MUR:de soutènement		PPI:Protection de pied (enrochements, palplanches, nsberme)		Codes "désordres" spéciaux :		PRV:Prélèvement		PZO:piézomètre		PFT:Profil en travers		SDG:sondage				
	RVH:Ouvrage de revanche		CHE:Chemin (de service)		FOS:(contre-)fossé		RVT:Revêtement (de protection)		TAL:Talus												

Exemple (n°1) de fiche remplie.

Imprimerie LOUIS JEAN 05003 - GAP Dépôt Légal : 161 - Mars 2000

RECONNAISSANCE VISUELLE INITIALE DES LEVEES / fiche b										Opérateurs: FLECHARD / DURAND / MERIAUX				Réf PKa : plan cab. MARCHAND		Lg_section(m): 50	
Date : 12/03/1997		Commune : VARENNES / LOIRE				Lieu-dit : hameau de Gaure				Réf PKb :		Val : Authion					
Repérage général			PKa : de P48 à P49				PM_déb :		0		PM_fin : 50		PKb :				
Refer dés	Code dés	Code ouvr	Nb	Rep. lq.(m)	PKa (calc)	Repérage transversal		Photo		Description du(des) désordre(s)		code grav	Observations d'ensemble : ouvrages lq. / accès / photo				
						Origine	Dist	Pente	Nb	No			Code	O/N/I	Précision(s) sur nature d'ouvrage		
1	VEG	TAL	n	/		BCV	0	0			Haie au sommet du talus	1	RCH	N			
2	VEG	/	4	-10		PLV	0	0			Arbres fruitiers en pied de talus	1	MUR	O	mur de maison faisant soutènement		
3	OSG	TAL	1	48		PLV	0	0			Cabane en dur (entaille de 1 m de hauteur sur 4 m de longueur)	1	FOS	N			
4	ERD	TAL	1	43		PLV	0	0			Entaille en pied de talus de 0,8 m de hauteur sur 15 m de longueur	1	CHE	N			
5	IFU	/	1	36		PLV	5	0			Zone de fuite lors des crues d'après témoignage de Mr ROBERT	2	RVT	N			
6	OSG	TAL	1	35		PLV	0	0			Cabane en bois (entaille de 1 m de hauteur sur 2 m de longueur)	1	AUT				
7	ERD	TAL	1	23		BCV	0	0			Entaille en sommet de talus de 1 m de hauteur sur 20 m de longueur	1	Accès: / Photo Rep.lq.(m) Direction Numéro				
8	OSG	TAL	1	5		BCV	3	0			Mur de maison faisant soutènement sur 3 m de hauteur et 19 ml	2	Comment: d'ensemble Amont<->Aval				
9											Coordonnées de Mr ROBERT, riverain rencontré lors de la visite : xyz. Difficultés probales d'accès (prop. privés)						
10																	
Refer dés	Code dés	Code ouvr	Nb	Rep. lq.(m)	PKa (calc)	Repérage transversal		Photo		Description du(des) désordre(s)		code grav	Observations d'ensemble : ouvrages lq. / accès / photo				
						Origine	Dist	Pente	Nb	No			Code	O/N/I	Précision(s) sur nature d'ouvrage		
1	FIS	RVH	1	42		BCF	0	0			Fissure traversante	1	RTE	O			
2	OSG	RVH	1	45		BCF	0	0			Porte (batardable) No 22 (signalée par erreur No 21 sur le plan)	1	CHE	N			
3	OSG	RVH	1	4,5		BCF	0	0			Porte (batardable) No 21	1	RVH	O	se prolonge en soutènement du talus côté fiv		
4	FIS	RVH	1	7		BCF	0	0			Fissure traversante	1	RVT	N			
5												AUT					
6												Accès: O Photo Rep.lq.(m) Direction Numéro					
7												Comment: d'ensemble Amont<->Aval					
8																	
9																	
10																	
Refer dés	Code dés	Code ouvr	Nb	Rep. lq.(m)	PKa (calc)	Repérage transversal		Photo		Description du(des) désordre(s)		code grav	Observations d'ensemble : ouvrages lq. / accès / photo				
						Origine	Dist	Pente	Nb	No			Code	O/N/I	Précision(s) sur nature d'ouvrage		
1	DEJ	RVT	n	/		BCF	0	0			Quelques joints de maçonnerie absents	1	PPI	I	risberme en terre et qqs blocs de pierre		
2	PLI	/	1	/		BCF	-11,5	0			Cote du fleuve levée le jour de la visite : zzz	1	RVT	O	avec aussi (?) un rôle de contrefort		
3	ERF	/	1	47		BCF	-6,5	0			Indice de début d'érosion ponctuelle (à 2,5 m du pied du perré)	2	CHE	N			
4	ERF	/	1	4,5		BCF	-7,5	0			Indice de début d'érosion ponctuelle (à 3 m du pied du perré)	2	MUR	O	en prolongement de la murette de revanche		
5												RCH N					
6												AUT					
7												Accès: N Photo Rep.lq.(m) Direction Numéro					
8												Comment: d'ensemble Amont<->Aval					
9												Le mur en prolongement de la murette de revanche joue un rôle de soutènement sur 0,8 à 1 m de hauteur					
10																	

Table des codes de désordre	Toutes par-ties :	VEG:Végétation	MVT:Affaiss/Tass/Gliss/Bascuit	FIS:Fissure	Partie côté Val:	DEP:Dépression/Etang	IFU:Indice de fuite	Desordres s/ouvrages maç/anx :	DEJ:Déjointoyage/Pierres enlevées	Partout :
		RAV:Ravinement	CAN:Canalisation/Passage busé	FON:Fontis	Partie côté fleuve:	ERF:Erosion par le fleuve	NVC / NVE:Niveau de crue / d'eau	ALT:Altération(pier.)	DES:Déstructuration	AUT :
		OSG:Ouvr. singul.	ERD:Erosion long diverse/Entaille	TER:Terrier		PLI:Proximité du lit mineur		DEC:Décollement/Mouvement différentiel		autres(s)
Codes (élt) d'ouvrage	RCH:Recharge/Engraisement	RTE:Route	MUR:de soutènement	PPI:Protection de pied (enrochements, palplanches, risberme)	Codes "désordres" spéciaux :	PRV:Prélèvement	PZO:piézomètre			
	RVH:Ouvrage de revanche	CHE:Chemin (de service)	FOS:(contre)-fossé	RVT:Revêtement (de protection)		PFT:Profil en travers	SDG:sondage			

Exemple (n°2) de fiche remplie.

**Établie pour les levées de la Loire moyenne,
cette méthodologie de diagnostic est, en grande partie,
transposable à d'autres contextes d'endiguement
de protection contre les inondations.**

**En effet, le caractère «à sec» de l'endiguement
(le remblai à reconnaître n'est en charge que lors
des crues) - qui est le point commun à la plupart des
digues de protection contre les inondations - est
l'hypothèse de fond retenue dans l'analyse critique des
diverses techniques d'investigation répertoriées ;
en conséquence, l'inventaire et la description des
techniques et moyens de reconnaissance sont
pour une large part indépendants du contexte
spécifique des levées de type Loire.**

**La plupart des choix effectués dans
la définition de la méthode sont, en outre, explicités
et justifiés - ce qui permet de repérer aisément
les points de différence entre le cas de la Loire
moyenne et un autre cas de figure d'endiguement.
Enfin, le Cemagref a eu l'occasion de transposer
cette méthodologie de diagnostic à l'étude
d'autres configurations de cours
d'eau endigués, en particulier de fleuves
côtiers méditerranéens.**

ISBN 2-85362-524-9

Prix : 230 F TTC -35,06 €



9 782853 625241