

INTRODUCTION

LES ENJEUX DE L'ETUDE

L'étude, objet de ce focus, a pour enjeux d'évaluer la pertinence de l'utilisation de méthodes électromagnétiques pour l'auscultation des digues, en complément aux méthodes plus classiques reposant sur l'utilisation de la tomographie électrique et des sondages géotechniques. L'objectif est de montrer les forces et les faiblesses de la prospection électromagnétique utilisée dans le cadre du diagnostic de digues, ainsi que les avantages et les difficultés de sa mise en œuvre.

DIGUE DE PROTECTION ET DIAGNOSTIC

Une digue est un ouvrage linéaire dont une partie est surélevée par rapport au lit majeur (Fauchard & Meriaux 2005). Leur fiabilité est un enjeu majeur pour l'aménagement du territoire et la gestion des risques. Les épisodes de crues historiques endommagent localement les digues, créant ainsi des zones de faiblesse au sein de l'ouvrage. Pour garantir la sécurité de la population, il est nécessaire de localiser et caractériser ces potentielles zones de faiblesse.

En dehors des épisodes de crues, ces ouvrages restent non immergés, c'est-à-dire non soumis à des charges hydrauliques. Dans les cas rencontrés, la hauteur de ces digues est comprise entre 3 et 10 mètres pour une largeur au sol très variable allant de 20 à plus de 100 mètres.

Le diagnostic de digues de protection contre les crues s'inscrit dans le cadre de la mission géotechnique G5 définie par la norme NF P 94-500 de novembre 2013 dans la section « Diagnostic d'ouvrage existant ».

L'objectif de ce type de mission de diagnostic est d'identifier tout dommage ou dégradation de la digue pouvant remettre en question son intégrité et son rôle. Le diagnostic de digues consiste à réaliser des enquêtes documentaires, des visites de terrain puis des campagnes d'investigations géophysiques. L'interprétation des résultats de la campagne d'investigation géophysique permet de définir un programme d'investigations géotechniques. L'interprétation de tous les résultats permet ensuite d'évaluer les risques géotechniques qui pèsent sur l'ouvrage.

La méthode géophysique électromagnétique (EM) en champ proche peut ainsi s'inscrire dans ce type de mission d'auscultation sur les digues de protection (Boussicault 2007; Fargier et al. 2010). Elle est utile pour caractériser rapidement les matériaux de subsurface de façon continue et sur de grands linéaires.

LES DIGUES DU BASSIN DE LA LOIRE

Dans le cadre du marché relatif à la réalisation des études de dangers des digues domaniales de classes B et C dans les départements du Cher, de la Nièvre et de la Saône-et-Loire, 60 kilomètres d'ouvrage ont ainsi été auscultés (*Figure 1a*). Un prototype de dispositif mobile d'acquisition à grand rendement a été mis en œuvre lors d'un chantier de diagnostic de digues sur la Loire (*Figure 4b*, page 13). Un traitement automatisé, spécifiquement élaboré pour ce chantier, permet de mieux valoriser les mesures de terrain et ainsi d'en obtenir une information plus précise (*Figure 6*, page 17).

Pour cette étude, la structure interne des digues est classée selon deux modèles principaux (*Figure 1c*). Le modèle compartimenté consiste en un empilement de matériaux perméables entourant un noyau argileux. Le modèle homogène est quant à lui uniquement constitué d'un ensemble de matériaux sableux perméables (Philipponnat & Hubert 2008).

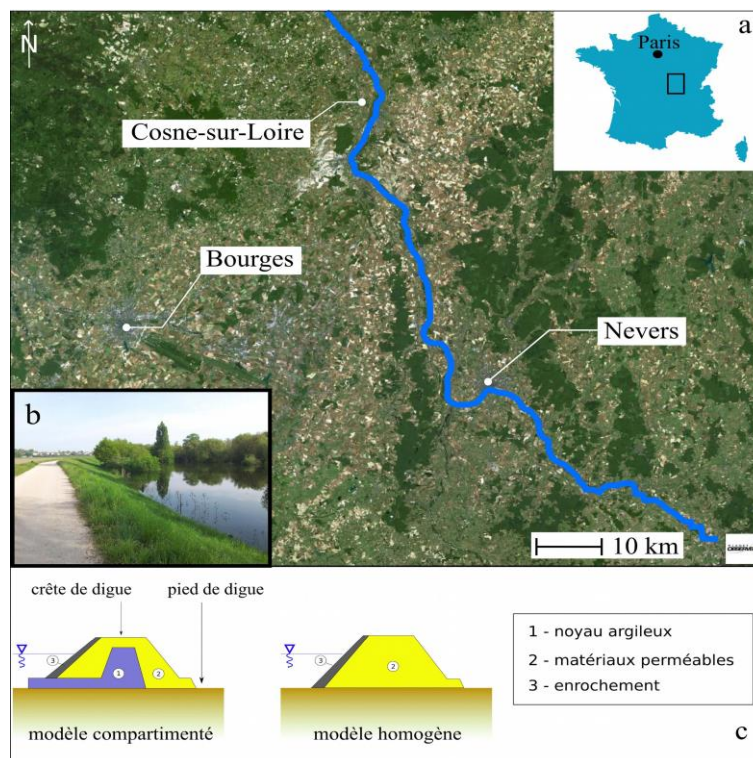


Figure 1 : Contexte de l'étude

a) Carte de localisation du bassin de la Loire.

b) Vue depuis la crête d'une digue typique du bassin de la Loire.

c) Schémas des deux types de structures internes rencontrées sur les digues de la Loire.

MÉTHODE ÉLECTROMAGNÉTIQUE EN CHAMP PROCHE CONTROLÉ

2 A - Propriétés électriques et magnétiques des sols

2 A.1 - CONDUCTIVITE ELECTRIQUE

Un matériau géologique est composé de trois phases, la phase solide (minérale), la phase liquide (solution) et la phase gazeuse (air) (Philipponnat & Hubert 2008). La conductivité σ d'un matériau, exprimée en millisiemens par mètres (mS/m), représente sa capacité à faire circuler un courant électrique. Elle correspond mathématiquement à l'inverse de la résistivité ρ (ohm.m).

Un courant électrique continu se propage dans un sol soit par la circulation des électrons libres dans le solide, soit par la circulation à la surface des grains, soit par la conduction des ions contenus dans l'eau captive du matériau (Keller & Frischknecht 1966). D'une manière générale, la conductivité apparente d'un matériau géologique est fonction de :

- la conductivité intrinsèque du matériau minéral,
- la conductivité de la solution,
- le rapport de proportion solide / liquide / gaz.

L'air est un milieu disruptif et sa conductivité est considérée comme nulle. La conductivité des matériaux solides géologiques (sols/roches) est très faible par rapport à la conductivité de la solution liquide. Dans la plupart des cas rencontrés, c'est donc la proportion de la solution dans le sol ainsi que la force ionique de cette solution qui détermine la conductivité totale mesurée.

La mesure de terrain représente une conductivité intégrée sur un volume de sol, et ce quelle que soit la méthode utilisée. On parle alors de conductivité apparente σ_{app} .

La mesure de conductivité apparente du sous-sol σ_{app} (mS/m) (inverse de la résistivité) permet ainsi de caractériser les terrains auscultés et de les classer selon leur gamme de conductivité (Palacky 1988). Il a de plus été montré que les principaux facteurs influençant la conductivité apparente du sol sont la proportion d'argile ainsi que la teneur en eau (Van Dam et al. 2005). L'étude de la variation spatiale de ce paramètre permet donc de fournir une image de l'hétérogénéité de l'ouvrage ausculté.

2 A.2 - SUSCEPTIBILITE MAGNETIQUE

La susceptibilité magnétique χ est la capacité d'un matériau à réagir à l'application d'un champ magnétique uniforme. La susceptibilité volumique d'un matériau est définie comme le rapport entre l'aimantation induite M et le champ primaire H (tous deux en Ampère par mètres, A/m) :

équation [1]
$$\vec{M} = \chi \vec{H}$$

Cette propriété magnétique des sols est étudiée notamment dans le cadre d'études géophysiques appliquées à l'archéologie (Simon 2012; Hulin 2014).

La susceptibilité magnétique d'un sol est principalement due à la présence de minéraux, d'oxydes et d'hydroxydes de fer ferrique tels que la magnétite ou la maghémite présents dans la fraction argileuse. Certains milieux anaérobiques humides sont propices au développement de magnéto-bactéries et donc à la formation des minéraux porteurs du signal magnétique des sols (Fassbinder & Stanjek 1994).

Il est donc possible d'utiliser le signal magnétique du sol comme discriminant pour identifier certains sols en se basant sur la classification existante (Lahmar et al. 1989). Les signaux magnétiques forts peuvent être assimilés à la présence de certains types de sols :

- sols argileux,
- sols bruns calcaires à bruns calciques,
- sols sur matériaux limoneux-loessiques,
- horizons pédologiques.

2 B - Principe général des mesures EM

Les mesures électromagnétiques basses fréquences en champ proche reposent sur le principe de propagation de champ d'induction électromagnétique.

Un champ primaire H_p est créé par la circulation d'un courant électrique alternatif dans une première bobine (émettrice 'Tx') qui se diffuse dans le sol. Il va alors être généré des courants électriques secondaires au sein des objets électriquement conducteurs soumis à ce champ. Ces courants internes, dits de Foucault, génèrent alors un champ magnétique secondaire oscillant H_s . La somme de H_p et de H_s est mesurée avec une seconde bobine (réceptrice 'Rx') située à une distance s (mètres) de la première (Figure 2, page 9).

Le signal oscillant mesuré par l'appareil est assimilé à un nombre complexe composé d'une partie réelle (signal en phase) et d'une partie imaginaire (signal en quadrature de phase). Sous certaines conditions, le signal en quadrature est corrélé à la conductivité apparente du milieu ausculté par (McNeill 1980) :