

Electromagnétisme, Eau, Risques

Test d'une nouvelle méthode de prospection (procédé TEM-FAST)

présentation par **Denis Fabre**, coordonnateur

Lirigm, Université Joseph Fourier, BP 53, 38041 Grenoble Cédex 9
mél. : dfabre@ujf-grenoble.fr

Participants au projet :

Pierre Desvarreux, Lionel Lorier

- **ADRGT** (Association pour le Dév. de la Recherche sur les Glissements de Terrain, Grenoble)

Dider Richard, Muriel Lagauzère

- **CEMAGREF** (Division Erosion torrentielle, Neige, Avalanches, Groupement de Grenoble)

Pavel Barsukov

- **EMRC** (Centre de Recherche en Electromagnétisme, Académie des Sciences, Moscou)

Michel Dietrich, Stéphane Garambois

- **LGIT** (Laboratoire de Géophysique Interne et de Tectonophysique, Grenoble)

Denis Fabre, Jean-Marc Vengeon,

- **LIRIGM** (Laboratoire Interdisciplinaire de recherches en Géologie et Mécanique, Grenoble)

Francis Robach

- **PGRN** (Pôle Grenoblois d'Etude et de Recherche sur les Risques Naturels)

Gilles Ménard (LGCA, Chambéry)

1. CONTEXTE SCIENTIFIQUE GÉNÉRAL

En géophysique, la résistivité électrique est un paramètre classique dont la sensibilité à la teneur en eau est reconnue depuis longtemps. De grandes sociétés de services (CGG, Schlumberger) ou de simples bureaux d'études proposent de "l'électrique" de façon standard aussi bien pour des actions d'exploration que de surveillance. Les techniques galvaniques "Schlumberger" et "Wenner", qui font image de référence, opèrent dans le domaine des courants continus et, usuellement, pour des profondeurs de quelques mètres à quelques dizaines de mètres..

Partant du continu, les expériences se sont progressivement étendues, au cours des dernières décennies, à l'ensemble du spectre électromagnétique avec par exemple la magnétotellurique, les sources contrôlées dans le domaine fréquentiel, l'électromagnétisme transitoire. Ce dernier, par la maîtrise de l'excitation et par l'importante profondeur d'investigation possible, paraît bien adapté aux problèmes de risques naturels concernant les versants.

Les progrès de l'électronique en instrumentation pour l'électromagnétisme transitoire vont dans le sens d'une investigation à spectre large avec un minimum d'opérations. Cette technique est particulièrement séduisante sur le terrain, lorsqu'on utilise une même boucle pour l'émission puis, après la coupure brusque du courant d'émission (signal "carré"), pour la réception des champs magnétiques induits par les courants transitoires qui circulent dans le milieu naturel. La gestion des émissions, des réceptions et des acquisitions est contrôlée par un PC portable. L'emploi d'une boucle en émission/réception est une formule commode pour la reconnaissance géophysique et la surveillance. Elle peut être remplacée par une configuration différente à deux boucles séparées, comme en forage par exemple, où l'émission est fixe en surface et la réception mobile dans le puits de forage. On trouvera en bibliographie une description des configurations utilisées et des options techniques retenues en fonction du problème posé (Nabighian & Macnae *in* SEG, 1991).

En principe, avec une seule mesure on capte la globalité des phénomènes sur toute la bande de fréquence. L'information obtenue est d'une grande richesse, mais elle pose par voie de conséquence des problèmes d'interprétation difficiles. La principale difficulté provient de la compréhension encore limitée de la physico-chimie des milieux naturels et de la variété des mécanismes en jeu. Une autre difficulté provient des insuffisances des modélisations électromagnétiques 3D de milieux complexes (temps de calcul encore excessifs).

On assiste néanmoins actuellement à une évolution rapide de l'interprétation, avec des développements théoriques importants (incorporation de la polarisation induite dans les modèles) et l'exploitation des possibilités informatiques (inversion dans des délais raisonnables). La méthodologie de l'électromagnétisme transitoire se concrétise aujourd'hui par une instrumentation performante (avec traitement du signal incorporé pour éliminer le bruit EM) et des techniques d'interprétation qui dépassent le stade du qualitatif et qui donnent une véritable dimension à ces nouvelles techniques.

Enfin, le dispositif permet une profondeur d'investigation très avantageuse par rapport aux autres méthodes de prospection géophysique employées en Génie Civil (environ trois fois la taille caractéristique de la boucle-antenne utilisée). La profondeur "éclairée" est nettement supérieure à celle des sondages type Schlumberger, par exemple.

2. OBJECTIFS ET DÉROULEMENT DU PROJET

Le point de départ de notre proposition est une collaboration internationale entre le CEA/LETI de Grenoble (F. Robach) et EMRC (Centre de Recherche en Electro-Magnétisme, du Prof. Fainberg de l'Académie des Sciences de Moscou) qui fonctionne depuis plusieurs années dans le domaine de la modélisation EM principalement. En particulier, EMRC développe un procédé d'électromagnétisme transitoire nommé TEM-FAST qui associe une composante instrumentale et un contexte d'interprétation théorique et numérique performants.

Dans un premier temps, il était proposé au Plan Etat-Région de soutenir une action transversale associant électromagnétisme, eau et risques pouvant déboucher sur la création d'une équipe pluridisciplinaire de recherche et de formation associant géophysiciens, géologues et spécialistes des risques naturels. Dans ce cadre, il était demandé l'achat d'un nouvel appareil de prospection TEM-FAST et de son logiciel d'interprétation. La mise en oeuvre de cet outil, d'abord sur des sites connus par d'autres méthodes (sondages, mesures géophysiques) aurait pu être étendue ensuite à d'autres sites, l'appareil restant disponible pour de nouveaux champs d'investigation.

Pour des raisons budgétaires, seule une partie de ce programme a pu être réalisée ; l'appareil a été loué à EMRC pour une durée de trois mois et deux missions d'assistance technique (P. Barsukov) ont eu lieu en début et en fin de période (mars et juillet 1998). Il a donc été réalisé une série de tests de l'appareil et de la méthode EM transitoire sur plusieurs sites où la structure du sol était déjà au moins partiellement connue par des sondages mécaniques et, si possible aussi, par des mesures géoélectriques. La sélection des sites a également privilégié des cas où la présence d'eau était connue dans le sous-sol, avec des risques d'instabilité de versant associée.

RÉFÉRENCES

SEG (Society of Exploration Geophysists) : Electromagnetic methods in applied geophysics . Vol 1 : Theory (1988) ; Vol 2 : Applications, Part A and Part B (1991)

TEM-FAST : Prosystem, Short Description TEM-INT, Program Notice, EMRC (disponible par mail auprès de Prof. E.B. Fainberg " fain@geo.igemi.troitsk.ru ")

3. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS.

Les données acquises sur chaque site test font l'objet de fiches détaillées fournies en annexe du rapport général. Les annexes comportent des exemples de résultats de mesures se traduisant par des diagrammes, avec :

- en abscisses, le temps en microsecondes après l'arrêt de l'émission;
- en ordonnées la résistivité équivalente déduite de l'amplitude du signal EM induit.

Sur ces diagrammes figure une interprétation correspondant à la courbe tracée. Un exemple est donné ci-après.

A partir des interprétations de chaque essai, on présente ensuite des profils interprétés en termes d'horizons géologiques de résistivité identifiée. Un exemple est également présenté ici.

Les principaux résultats, les difficultés rencontrées et les perspectives font l'objet d'une synthèse par site, présentée ci-dessous.

3.1 Monestier de Clermont

Sur ce site proche de Grenoble, le but était d'abord de familiariser les futurs utilisateurs de l'équipe à la méthode TEM-FAST. Neuf boucles de 25x25 m ont permis d'établir un profil du terrain sur une distance de 225 m. La profondeur de pénétration atteint une cinquantaine de mètres dans un contexte de terrains argileux : argiles glacio-cacustres du Trièves sur substrat de marnes noires (résistivités de 1 à 100 Ω m).

Les niveaux d'alluvions argileuses donnent des résistivités très faibles (comme d'ailleurs lors d'une première mesure effectuée sur le Campus de Grenoble). On met clairement en évidence un niveau moins argileux vers 5 à 10m de profondeur et le contact probable avec le substrat à 20m de profondeur. La partie droite du profil est perturbée par la présence en surface d'une ligne électrique.

3.2 Séchilienne

Sur le site accidenté du versant de Séchilienne, l'objectif était de tester la méthode dans un contexte de rocher fracturé peu conducteur en dehors d'éventuelles zones aquifères. Les configurations de boucles testées ont été de 50x50 m et de 100x100 m sur 9 sites (dont 1 dans la vallée de la Romanche, en pied de versant).

Pour les sondages dans le versant, une structure "tricouche" apparaît nettement avec un niveau de surface conducteur très mince surmontant une épaisse couche peu conductrice (2000 à 3000 Ω m) à interpréter comme du rocher fracturé et non saturé. Le substratum conducteur qui lui fait suite vers 200m de profondeur est donné avec une valeur faible (< 100 Ω m) peu fiable dans l'absolu, mais indicatrice d'une bien meilleure continuité et d'une probable saturation.

La profondeur d'investigation est donc ici très importante. En contre partie, on manque de finesse pour détecter d'éventuelles circulations localisées dans le rocher à plus faible profondeur. Ceci est d'autant plus vrai lorsque l'eau n'est que faiblement minéralisée.

3.3 Charlaix

Au lieu-dit "Charlaix", entre La Mure et Corps, un lacet de la route nationale RN85 réalisé dans des terrains glacio-lacustres est affecté de mouvements importants et chroniques, qui endommagent la chaussée et les murs de soutènement. Plusieurs sources et zones humides soulignent le rôle de l'eau dans ces instabilités et ont orienté la DDE vers des études de drainage.

Dans ce contexte, deux profils TEM-FAST ont été réalisés avec des boucles de 25 m de côté en amont de la RN 85, dans la zone de deux sondages électriques préalables. Les profils TEM-FAST réalisés révèlent, à l'interprétation, un approfondissement brutal de l'horizon résistant (de 35 m à 45 m), avec une alternance de couches plus ou moins perméables dans la partie droite du profil. Il est clair cependant que la résolution de l'appareil ne lui permet pas de détecter les passées perméables superficielles qui semblent responsable des désordres. La méthode semble plutôt utile dans ce

contexte pour fournir une vision "intégratrice" complémentaire en profondeur et détecter d'éventuelles anomalies (comme cette transition latérale).

3.4 Annecy (Z.I. Les Iles)

Pour tester les performances de l'outil TEM-FAST en détection de niveaux aquifères, nous avons mené une série de mesures sur la Z.I. des Iles, à Annecy, sur une terrasse alluviale du Fier, où un forage de 150 mètres nous renseigne sur la stratigraphie du sous-sol. Dans cette zone peu bruitée, la qualité des mesures a été très bonne et 17 boucles de 50x50 m ont pu être réalisées dans la journée. La profondeur investiguée atteint 200 m.

L'essai d'étalonnage direct à coté du forage ne donne pas de bons résultats, à cause de la présence d'un tubage métallique sur 40 m (celui-ci est probablement aussi responsable des anomalies du profil de résistivité donné pour ce forage). Un bon accord est trouvé entre la mesure TEM-FAST et la stratigraphie sur les 60 premiers mètres (couche d'alluvions sablo-graveleuses de 35 m d'épaisseur, à 200 Ω m, surmontant des niveaux plus conducteurs un peu argileux à 80 Ω m).

En revanche, la mesure EM n'est pas assez fine pour détecter la présence de minces couches conductrices plus profondes (quelques mètres, au delà de 60 mètres de profondeur), telles que les signale le forage. De plus, la méthode d'interprétation est marquée par une très forte non-unicité des solutions, d'autant plus marquée que le modèle comporte de nombreuses couches. Enfin, il semble gênant que les logiciels d'interprétation introduisent systématiquement un milieu très conducteur en profondeur.

3.5 Les Arcs

Le contexte naturel du versant des Arcs en Savoie entre 600 et 1800 mètres d'altitude est relativement bien connu à cause des études géotechniques entreprises à la suite de la catastrophe de la coulée de boue de la Ravoire en 1981. Le rocher est constitué de schistes et de grès du Houiller très altérés sur une forte épaisseur (pouvant atteindre la centaine de mètres).

Le premier site (Le Fevet) a permis de réaliser 5 "sondages" avec une boucle de 25x25 m et une dernière boucle de 50x50 m sur le site n°6. Les cinq premières boucles donnent des résultats cohérents et en accord avec ceux obtenus par deux sondages électriques classiques (méthode Schlumberger). On trouve des terrains altérés à 40 -70 Ω m sur une épaisseur d'une trentaine de mètres, puis un substratum conducteur avec une résistivité beaucoup plus faible.

Le deuxième site (Le Bérard) donne des résultats comparables (6 boucles dont 4 de 25x25 m et 2 de 50x50 m) avec cependant une épaisseur de terrains altérés plus importante (40 à 50 mètres). La méthode est bien adaptée au contexte géologique avec des milieux assez conducteurs, un bon rapport signal / bruit et aucun effet parasite dû à des lignes électriques ou canalisations.

3.6 Modane

Deux sites assez différents ont été testés. Pour chacun d'entre eux, on dispose de données de sondages assez proches.

Le premier, près du Roc Tourné (4 boucles), ne donne des résultats que pour les 2 boucles de 50x50m. On trouve une structure tricouche. La première couche à 170 Ω m correspond à la moraine sur une dizaine de mètres. La deuxième a environ 3000 Ω m correspond au rocher fracturé sec (gypse). Le substrat conducteur à 20 Ω m serait le rocher saturé. La profondeur correspond pour les deux boucles à peu près à la cote de l'Arc ce qui pourrait être interprété comme la nappe de fissures accompagnant la rivière.

Le deuxième site (Avrieux) a permis un plus grand nombre de boucles de 50x50 m (8) et une de 100x100 m. Les résultats sont interprétés comme mettant en évidence des "couloirs" de rocher fracturé aquifère fortement minéralisé (2 à 50 Ω m) à des profondeurs variant entre 110 et 200 m. Le niveau superficiel (micaschistes et quartzites) est mesuré à plusieurs milliers d' Ω m. L'étendue des mesures en surface a dû être limitée, à cause de la présence de lignes à haute-tension.

4. BILAN

4.1 Perturbations EM

Dans de nombreuses expérimentations nous avons été perturbés par les lignes électriques haute tension; la règle d'éloignement préconisée par P. Barsukov est de se maintenir écarté de la ligne de plus de trois fois la hauteur des pylones EDF. Cette loi empirique qui semble correcte est souvent contraignante dans nos vallées alpines dotées d'un réseau dense de lignes moyenne tension. Sur le site des Ruines de Séchilienne, une ligne HT passe en plein milieu de la pente et rajoute une complication supplémentaire à des conditions de travail difficiles. Schématiquement on se trouve confronté : **d'une part** au rayonnement de la ligne qui introduit un niveau important de 50 Hertz et d'harmoniques captés dans la boucle de mesure; ce problème fondamental est minimisé jusqu'à un certain point par des techniques de mesures répétitives et de traitement du signal qui sont défailtantes dans la zone interdite définie plus haut; **d'autre part**, au couplage direct entre la ligne et la spire de mesure ("mutuelle induction"). Ce dernier point apparaît également, lorsqu'on se trouve à proximité de tuyauteries métalliques, réseaux électriques enterrés, etc.

Il est clair qu'il n'y a guère de lutte possible contre un environnement trop urbanisé et qu'il est fort recommandé, avant une intervention sur un terrain quelconque, d'avoir des renseignements concernant les éléments cités. Pour ce qui est du rayonnement, on peut, avec des courants d'émission plus importants, gagner en rapport signal / bruit. Ce point est sans doute à présent suffisamment clair dans le retour d'expérience d'EMRC et les nouvelles générations d'instruments auront une possibilité de multiplier ce courant par trois. Cette mesure est utile pour la qualité des mesures, mais se paie bien entendu en termes de puissance électrique.

4.2 Valeurs des résistivités

Dans bon nombre d'expériences les conductivités affichées par le système TEM-FAST semblent plus fortes (ou plus faibles) que celles issues de méthodes électriques conventionnelles. Ces divergences font actuellement l'objet de recherches intéressantes (Hautot & Tarits, Investigation in Geophysics, SEG, 1998).

On peut remarquer que, dans les techniques électriques conventionnelles, on se trouve dans un schéma de conduction ionique, où l'expérience peut se comparer à une électrolyse. En TEM-FAST, l'instrument, au sens de la géophysique et de l'EM transitoire, se situe dans le domaine des fréquences élevées (détection jusqu'à 2 MHz). Le mécanisme de conduction dans les roches n'est pas physiquement le même, et il y a sans doute une part plus importante de mode de conduction non ionique. Les équations de Maxwell en EM transitoire sont de type diffusif sans courants de déplacement. Il est donc prudent de dire que les méthodes perçoivent des modes de conductions différents et que la conductivité affichée par une méthode transitoire est d'abord utilisée pour ses variations relatives.

4.3 Profondeurs d'investigation

Le TEM-FAST commence son processus d'acquisition 4 microsecondes après la coupure du courant dans la spire d'émission. La partie précoce de la réponse est dominée par la réponse propre de la spire; ceci limite la taille de la spire et introduit une zone d'ombre dans l'interprétation, particulièrement désagréable puisqu'il s'agit des zones superficielles qui sont souvent bien caractérisées et qui peuvent conforter une interprétation.

Conscient de cette limitation, EMRC développe un appareil qui fonctionne en mode galvanique, c'est à dire avec des électrodes selon un canevas électronique exploité dans le TEM-FAST (qui lui fonctionne en mode inductif). Les premiers résultats, d'après EMRC, indiquent que les deux appareils, chacun doté de son système d'interprétation propre ne donnent pas le même résultat dans la zone de recouvrement. Le système galvanique détaille les formations superficielles et à moyenne profondeur, l'inductif est meilleur pour les niveaux moyens et profonds.

La méthode est donc complémentaire de la prospection galvanique classique. Et l'intérêt majeur qu'elle présente est sa grande profondeur d'investigation qui renseigne sur les structures géologiques jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 200 m avec les boucles de maille classique (50 m), sans toutefois préciser la structure métrique des premières dizaines de mètres.