

Apport de l'association des méthodes TDEM (*Time-Domain Electromagnetism*) et électrique pour la connaissance de la structure du glissement-coulée de Super Sauze (bassin de Barcelonnette, Alpes-de-Haute-Provence, France)

Contribution of a combined TDEM (Time-Domain Electromagnetism) and electrical survey to the investigation of the Super Sauze flowslide internal structure

Myriam Schmutz^{a,b*}, Roger Guérin^c, Olivier Maquaire^a, Marc Descloîtres^d, Jean-Jacques Schott^b, Yves Albouy^d

^a Centre d'études et de recherches éco-géographiques (Cereg), EP 2037 CNRSURA 95, ULP, ENGEEES, 3, rue de l'Argonne, 67083 Strasbourg cedex, France

^b École et Observatoire des sciences de la Terre (Eost), UMR EP533, université Louis Pasteur, 5, rue René-Descartes, 67084 Strasbourg cedex, France

^c Département de géophysique appliquée, UMR 7619 Sisyphe, université Pierre-et-Marie-Curie (Paris-6), case courrier 105, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France

^d Laboratoire de géophysique, Institut de recherche pour le développement (IRD, ex Orstom), 32, av. Henri-Varagnat, 92143 Bondy cedex, France

(Reçu le 8 septembre 1998, accepté après révision le 26 avril 1999)

Abstract — The aim of this study is to determine an investigation protocol that permits the Super Sauze flowslide to be described along continuous lines, through the association of electrical and TDEM (*Time-Domain Electromagnetism*) methods. The transition from one resistivity range to another often corresponds to the three layer limits defined by geotechnical soundings. The results presented show that the combined methods are well suited to the question investigated and that they are validated by the geotechnical data. (© Académie des sciences / Elsevier, Paris.)

flowslide / electrical / TDEM (*Time-Domain Electromagnetism*)

Résumé — L'objectif de cette recherche est de déterminer un protocole d'investigation permettant de décrire la structure de la coulée de Super Sauze le long de profils continus, en employant les méthodes électriques et TDEM (*Time-Domain Electromagnetism*) associées. Le passage d'une gamme de résistivité à la suivante correspond souvent aux limites des trois terrains définies par les sondages géotechniques. Les résultats présentés montrent que les méthodes employées sont adaptées à la problématique ; ils sont validés par la géotechnique. (© Académie des sciences / Elsevier, Paris.)

glissement-coulée / panneau électrique / TDEM (*Time-Domain Electromagnetism*)

Note présentée par Jean-Paul Poirier.

* Correspondance et tirés à part.
schmutz@geographie.u-strasbg.fr

1. Introduction

Le glissement de Super Sauze (Bassin de Barcelonnette, Alpes de Haute-Provence) évolue en une coulée de débris qui fossilise un bassin torrentiel. Dans le but d'évaluer le niveau de risque lié à la transformation plus ou moins brutale de tout ou partie de cette coulée de débris en lave torrentielle, il est nécessaire d'en connaître la structure interne et de définir la paléo-topographie.

Les caractéristiques physiques différenciant la roche en place et les différentes couches constituant la coulée sont la différence de compaction et la teneur en eau, qui peuvent être mesurées, notamment, par la résistivité électrique.

Dans la plupart des prospections géophysiques sur les coulées boueuses ou de débris, la résistivité est mesurée par des méthodes de sondages électriques à courant continu. Si elles sont adaptées, dans la plupart des cas, à la reconnaissance des variations de résistivité selon la profondeur, elles se heurtent cependant à des problèmes d'hétérogénéités de surface, latérales et de topographie.

En revanche, les prospections qui proposent l'utilisation des méthodes de sondages électromagnétiques en domaine temporel pour repérer les contrastes de résistivité sur ce type de phénomène sont inexistantes.

La méthodologie proposée dans le cadre de cette recherche s'appuie sur l'utilisation associée de la méthode électrique à courant continu mise en œuvre sous forme de panneau électrique 2D et de la méthode des sondages électromagnétiques dans le domaine temporel, ou sondages TDEM (*Time-Domain Electromagnetism*).

La première permet de prendre en compte dans l'interprétation les variations latérales de résistivité et la topographie, tandis que la seconde permet :

- une profondeur d'investigation importante pour un dispositif peu étendu en surface ;
- une mise en œuvre rapide et sans contact avec le sol ;
- une sensibilité moindre aux hétérogénéités de surface et aux effets de topographie.

Les résultats obtenus selon un profil continu transversal à la coulée permettent :

- de comparer les interprétations électriques et TDEM avec les résultats des sondages géotechniques ;
- de mettre en exergue la complémentarité des deux méthodes.

2. Contexte

Le bassin de Barcelonnette, dans les Alpes-de-Haute-Provence, fournit de nombreux exemples de glissements de terrain actifs localisés dans les marnes noires callovo-oxfordiennes. Ces glissements évoluent en coulées de débris hétérogènes, plus ou moins compactées, qui fossilisent des ravines. Cette particularité induit une forte variabilité de l'épaisseur de la coulée. Ce type de phénomène est très répandu dans le monde (Zhang et al., 1991 ; Dikau et al., 1996), d'où l'intérêt de la recherche engagée.

Le glissement-coulée de Super Sauze, qui s'est déclenché dans les années 1950, s'étend sur une longueur d'environ 800 m entre les altitudes 2 105 m à la couronne et 1 740 m à la base de la coulée, et occupe une superficie de 17 ha. Il fait l'objet de mesures topométriques depuis 1991 (Flageollet et al., 1996), de photo-interprétations multi-dates (Weber et Bolley, 1998), d'investigations géotechniques par des sondages pénétrométriques, pressiométriques, destructifs paramétrés et carottés (Genêt et Malet, 1997) et de prospections géophysiques (Schmutz, 1996). Les premiers essais électriques ont permis de confirmer l'existence de contrastes de résistivité suffisants entre les deux couches distinctes de la coulée, de compacités différentes, et la marne en place.

3. Méthodes TDEM et électrique

Les fondements des méthodes électriques sont développés dans Lasfargues (1957) et ceux de la méthode TDEM, désormais bien établis, dans Kaufman et Keller (1983) et Descloîtres (1998).

Pour la méthode TDEM, nous avons mis en œuvre un équipement Protem 47 (Geonics Ltd), avec un dispositif géométrique comportant une bobine d'émission de petite dimension (5 × 5 m), et une bobine de réception déportée de 12,5 m. Cette géométrie permet de concilier maniabilité et rapport signal/bruit optimal, tout en évitant la saturation de l'appareil et du signal. L'espacement entre les points de sondage est de 5 m. Plus de 200 sondages ont été réalisés en 10 jours sur deux profils transversaux, malgré les difficultés d'accès au site.

Pour les mesures électriques, nous avons utilisé un panneau dipôle-dipôle, avec un appareillage Syscal R1 multi-électrodes (Iris Instruments), comportant deux tailles de dipôles (2 et 6 m). Cette configuration permet de concilier maniabilité, rapport signal/bruit optimal et une sensibilité moindre aux hétérogénéités de surface et à la topographie. L'équivalent de plus de 200 sondages a été réalisé en 20 jours autour des deux mêmes profils transversaux. L'espacement entre les points de mesures est de 4 m.

4. Interprétation des données

4.1. TDEM

Les enregistrements sont interprétés en 1D avec le logiciel TemixXL (Interpex Ltd.). La *figure 1* présente un exemple de sondage TDEM. Les résultats sont présentés sous forme de pseudo-sections, obtenues par juxtaposition des inversions 1D (*figure 3b*). En raison de la configuration utilisée, les interprétations ne fournissent des informations fiables qu'entre 4 et 40 m de profondeur (profondeur qui est largement suffisante, compte tenu du problème posé). L'effet du temps de coupure ne permet pas de renseigner les quatre premiers mètres de profondeur. Au-delà de 40 m, la médiocre qualité du rapport signal sur bruit empêche une interprétation fiable.

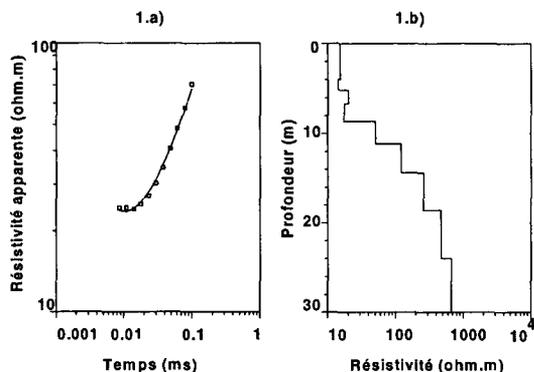


Figure 1. a. Sondage TDEM. b. Interprétation en variation continue de résistivité.

a. TDEM sounding example. b. Interpretation with the smooth model.

La plupart du temps, cette représentation permet de diviser le sous-sol en trois terrains superposés. Entre les abscisses 35 et 115 m, de la profondeur vers la surface, il est donc possible de distinguer :

- un terrain aux résistivités supérieures à $280 \Omega \cdot m$ (couche 3), repéré à des profondeurs qui oscillent entre 1 855 et 1 840 m ;
- le second terrain (couche 2), aux résistivités comprises entre 40 et $280 \Omega \cdot m$, a une épaisseur relativement constante d'environ 6 m et se cale sur les oscillations du toit du premier terrain ;
- le troisième terrain (couche 1), aux résistivités comprises entre 5 et $40 \Omega \cdot m$, présente des épaisseurs très variables, de 4 à 10–13 m au centre de la coulée. Ce dernier terrain peut être subdivisé en une partie très conductrice (1a), jusqu'à environ $15 \Omega \cdot m$, et une partie moyennement conductrice (1b), aux résistivités variant de 15 à $40 \Omega \cdot m$.

Il importe de noter, avant l'abscisse 35 m et après l'abscisse 95 m, c'est-à-dire aux extrémités de la coulée, un rétrécissement de cette couche 1. De même, dans ces deux secteurs extrêmes, la couche 2 est très épaisse et la couche 3 n'est plus détectée.

4.2. Mesure électrique

Les mesures sont interprétées en 2D avec le logiciel Res2dInv (M.H. Loke). La figure 2 présente un exemple de sondage issu du panneau. En raison de la limite imposée aux longueurs de lignes utilisées pour que le milieu puisse être considéré comme tabulaire, et de la puissance du signal nécessaire pour obtenir un rapport signal/bruit suffisant, la profondeur d'investigation est limitée à 10 m. Les données présentées sur la figure 3a indiquent la présence de deux terrains.

Les caractéristiques de résistivité des couches 1 et 2 sont les mêmes que celles obtenues par la méthode TDEM. Comme on s'y attendait, la couche 1 est largement prédominante sur la figure. Elle peut également être subdivisée en deux parties. La partie 1b est discontinue avec une prépondérance à l'est, alors que 1a est continue, même s'il existe des variations d'épaisseur. Les résistivités de la

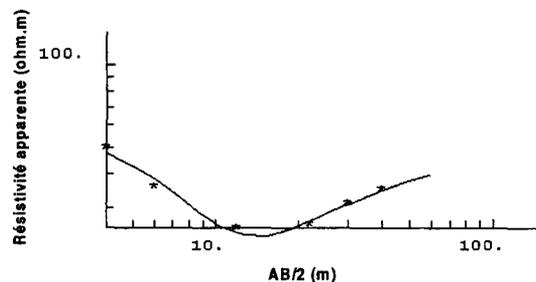


Figure 2. Exemple de sondage électrique issu du panneau.

Electrical sounding extracted from the 2D electrical imaging.

couche 2 apparaissent par îlots en surface (sur les deux premiers mètres) et par « taches » en profondeur (entre 7 et 10 m de profondeur).

4.3. Comparaison des résultats électriques et TDEM

La figure 3b met en évidence les zones détectées par l'électrique et par le TDEM, en employant une échelle de valeur différente pour les résultats de chaque méthode. L'échelle de valeur de la méthode TDEM est la même que celle de la figure 3a, représentant les résultats électriques. En revanche, l'échelle électrique de la figure 3b comprend seulement quatre niveaux (couche 1a, 1b, 2, 3), afin de mettre clairement en évidence les similitudes de résultats entre les deux méthodes.

À profondeur d'investigation égale, il apparaît une très bonne concordance pour la localisation de la couche 1b, même si son étendue varie d'une méthode à l'autre, et une bonne correspondance pour la limite des couches 1 et 2 pour les deux méthodes, exception faite pour l'abscisse 85 m, où les résistivités élevées sont bien localisées, mais pour des profondeurs différentes.

4.4. Comparaison des résultats électriques et TDEM avec les résultats des sondages géotechniques

La figure 3b superpose également les résultats des sondages géotechniques à ceux de géophysique, ce qui permet une comparaison directe des différents résultats. Il s'avère que la couche 1 correspond à la masse en mouvement de la coulée, la seconde à la masse compactée et sèche de la coulée, et la dernière au substratum.

Au vu de ces résultats, il semble que l'hypothèse tabulaire soit vérifiée, au moins dans le centre de la coulée, et ce, malgré la grande irrégularité de la paléo-topographie. Une interprétation 1D est donc adaptée au moins à cette partie, ce qui n'est pas le cas aux extrémités, puisque la forte épaisseur de la couche 2 définie par le TDEM ne correspond pas à la réalité. Ce dernier point devra donc faire l'objet d'investigation et de traitements complémentaires.

5. Conclusion

Les glissements-coulées fossilisant un bassin torrentiel n'ont que très rarement été étudiés par la géophysique, en raison de la grande variabilité de leur épaisseur, et le

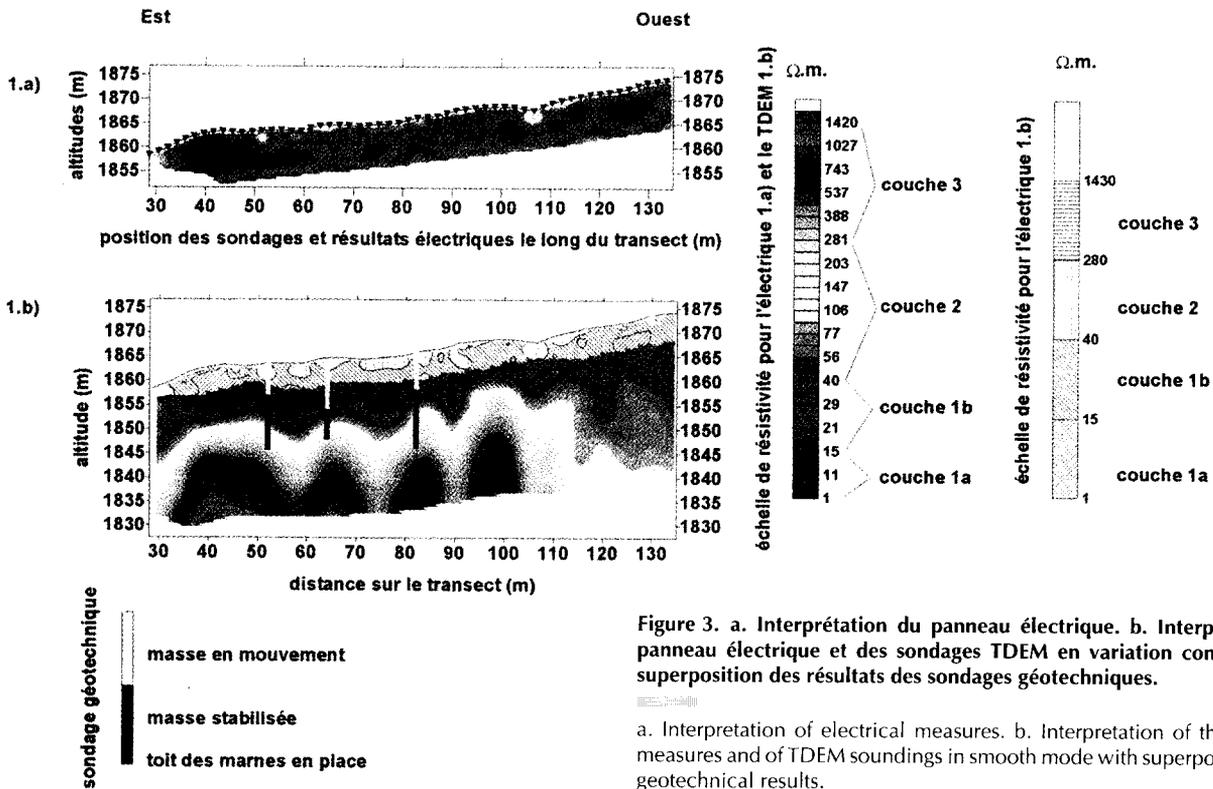


Figure 3. a. Interprétation du panneau électrique. b. Interprétation du panneau électrique et des sondages TDEM en variation continue, avec superposition des résultats des sondages géotechniques.

a. Interpretation of electrical measures. b. Interpretation of the electrical measures and of TDEM soundings in smooth mode with superposition of the geotechnical results.

TDEM n'a encore jamais été utilisé sur ce type de site. La méthodologie mise en œuvre constituait donc une première.

Les méthodes électrique et TDEM ont permis de déterminer la structure du transect étudié, qui est en trois couches. La première méthode nous renseigne sur les dix premiers mètres, et la seconde sur la tranche 4–40 m. Les résultats ont été validés ponctuellement par des points de mesures géotechniques.

Toutefois, les extrémités de la coulée échappent à cette bonne concordance entre les différents résultats obtenus

par la géophysique et par la géotechnique, probablement en raison d'effets 3D. D'autres traitements seraient à réaliser.

La méthode TDEM permet de détecter rapidement les limites des différents terrains de la coulée et de la paléotopographie, et elle s'avère très efficace pour des investigations au-delà de 10 m de profondeur. En revanche, elle ne donne pas d'information sur les tout premiers mètres d'épaisseur ; ces informations sont alors obtenues par la méthode électrique. L'utilisation des deux méthodes associées montre donc tout son intérêt dans le protocole d'investigation voulu.

Remerciements. Cette recherche a été financée en partie par le CNRS (Centre national de la recherche scientifique), dans le cadre du PNRN (Programme national sur les risques naturels), grâce au contrat PNRN 97/98-34MT (n° de contribution 124).

6. Références

Descloîtres M. 1998. Les sondages électromagnétiques en domaine temporel (TDEM) : application à la prospection d'aquifères sur les volcans de Fogo (Cap-Vert) et du piton de la Fournaise (La Réunion), *Thèse*, Université Pierre-et-Marie-Curie, Paris, 228 p.

Dikau R., Brunsden D., Schrott X. et Ibsen M. 1996. *Landslide Recognition/Identification, Movement and Causes*, Wiley, 251 p.

Genêt J. et Malet J.-P. 1997. Détermination de la structure tridimensionnelle du glissement de terrain de Super Sauze par une investigation géotechnique, *Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique*, Université Louis-Pasteur, Strasbourg, 138 p. et annexes

Kaufman A.A. et Keller G.V. 1983. *Frequency and Transient Soundings*, Elsevier, Amsterdam, 686 p.

Lasfargues P. 1957. *Prospection électrique par courants continus*, Manuels de prospection géophysique, Masson, Paris, 290 p.

Schmutz M. 1996. Détermination de la substructure du glissement de Super Sauze par des méthodes géophysiques, *Mémoire de DEA « Systèmes Spatiaux et Environnement »*, Université Louis-Pasteur, Strasbourg, 75 p.

Weber D. et Bolley A. 1998. Photo-interpretation of the topography from the Super Sauze basin in 1956, <http://sertit.u-strasbg.fr/projet/Barcelonnette/barcelfin.html>

Zhang X., Phillips C. et Marden M. 1991. Internal deformation of a fast-moving earthflow, Raukumara Peninsula, New Zealand, *Geomorphology*, 4, 145–154