



ELSEVIER

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience ●●● (●●●●) ●●●—●●●



COMPTES RENDUS

GEOSCIENCE

<http://france.elsevier.com/direct/CRAS2A/>

Géophysique interne

Caractérisation de la structure interne et de l'état hydrique de glissements argilo-marneux par tomographie géophysique : l'exemple du glissement-coulée de Super-Sauze

Gilles Grandjean ^{a,*}, Céline Pennetier ^b, Adnan Bitri ^a, Ombeline Meric ^c,
Jean-Philippe Malet ^d

^a Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), Aménagement et risques naturels, BP 6009, 45060 Orléans, France

^b Institut de physique du globe de Paris, 4, Place Jussieu, 75252 Paris, France

^c Laboratoire interdisciplinaire de recherche impliquant la géologie et la mécanique (LIRIGM), Maison des Géosciences, BP 53, 38041 Grenoble cedex 9, France

^d Faculty of Geosciences, UCEL, University of Utrecht, P.O. Box 80.115, 3508 TC Utrecht, The Netherlands

Reçu le 1^{er} décembre 2004, accepté après révision le 23 mars 2006

Présenté par Jacques Angelier

Résumé

Les méthodes géophysiques telles que la sismique et l'imagerie électrique apparaissent adaptées à l'étude des mécanismes de glissements de terrain. En effet, ces méthodes permettent de réaliser des mesures directes et non intrusives de la vitesse acoustique et de la résistivité électrique, paramètres essentiels décrivant les propriétés physiques des sols en mouvement. Ces deux méthodes ont été appliquées sur le site de Super-Sauze (Alpes du Sud, France), représentatif des phénomènes gravitaires de type glissement-coulée intramatériaux. Les investigations ont été effectuées simultanément sur deux profils orthogonaux : l'un, de 325 m de longueur, transverse à l'axe du glissement-coulée, l'autre, de 235 m, dans la direction de la pente en long du glissement-coulée. Les premiers résultats, présentant une corrélation entre les données sismique et électrique, confirment que l'utilisation conjointe de ces deux méthodes permet d'obtenir des informations complémentaires sur le comportement mécanique de ce type de glissements de terrain à savoir les variations de la densité de fracturation avec la sismique et les variations de l'état hydrique avec l'électrique.

Pour citer cet article : G. Grandjean *et al.*, *C. R. Geoscience* ●●● (●●●●).

© 2006 Publié par Elsevier SAS pour l'Académie des sciences.

Abstract

Characterization of the internal structure and the hydric state of clayey-marly landslides through geophysical tomography: example of the Super-Sauze earthflow. Geophysical methods such as seismic surveying and electrical resistivity imaging appear to be well-adapted to investigate and understand landslide mechanisms. They allow direct and non-intrusive measurement of acoustic velocity and electrical resistivity, two fundamental parameters used to define the physical properties of the reworked moving materials. Both methods were applied at the Super-Sauze site in the French South Alps, where a typical example of an intra-material earthflow-mudslide can be observed. Measurements were taken simultaneously along two orthogonal profiles: one 325 m in length is perpendicular to the axis of the earthflow; the other 235 m in length is located along the axis of the earthflow.

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : g.grandjean@brgm.fr (G. Grandjean).

The results show a correlation between the seismic and electrical resistivity data, confirming that the simultaneous use of both methods gives complementary information about landslide mechanisms. The seismic data provide information on fracture density variations, whereas the electrical resistivity data provide information on water content variations. *To cite this article: G. Grandjean et al., C. R. Geoscience ●● (●●●●).*

© 2006 Publié par Elsevier SAS pour l'Académie des sciences.

Mots-clés : Glissement de terrain ; Géophysique ; Tomographie ; Sismique ; Méthodes électriques

Keywords: Landslide; Geophysics; Tomography; Seismic survey; Electrical methods

Abridged English version

The aim of this study is to describe both the structure and water distribution of landslides using the geophysical parameters acoustic velocity V_p and electrical resistivity ρ . The study is focused on the Super-Sauze site (Alpes-de-Haute-Provence, France), an earthflow-type landslide. Such landslides are featured by either movements occurring along discrete shearing surfaces [2,4] or by continuous deformations depending on local constraints and covered topography [1,6]. Composed by heterogeneous materials, more or less water saturated, their morphology reveals three spatial units identified from the top to the bottom: the main escarpment, the transit zone and the accumulation lobe. Such landslides are featured by velocities comprised between 0.005 and 0.3 m a day. The deformations may occur as a consequence of the slow and continuous erosion of a surface by run off that, as it penetrates the sediments' fissures, reduces their stiffness and forms a gravitational flow. The intensity of these phenomena is controlled by the density of fissures and the interstitial water pressure [9]. Non-intrusive geophysical methods, such as seismic refraction and electrical resistivity imaging, are well-adapted to studying the mechanical behaviour of landslides. The inversion of seismic travel times and electrical apparent resistivities reveals the mechanical properties of a terrain by the means of two physical models: the velocity field, based on recorded travel times, that provides information concerning the state of compaction of the layers; and the resistivity field mainly related to the variations in water content. These physical models are used to analyse the degree of correlation between the two parameters V_p and ρ , with the intention of determining whether a specific geological behaviour can be characterized by a relationship between acoustic velocity and electrical resistivity.

The Super-Sauze earthflow (Fig. 1) was selected due to its particularly well-preserved natural environment, and because it has been monitored over several years [10]. It is representative of several slow earthflows observed in the French Alps: La Valette, Poche, Boulc

or Les Dourbes. Situated in the Barcelonnette Basin, on the left bank of the River Ubaye, the earthflow extends 820 m from its highest point at an elevation of 2105 m, to its base at an elevation of 1740 m, with an average slope gradient of 25 degrees. It covers an area of some 17 hectares (Fig. 1A and B). It is composed of Callovian-Oxfordian black marls, known as 'Terres Noires', with shades varying from black, to grey, to slightly blue. The surface is highly irregular, affected by plane fractures and surficial cracks [8], with several ravines in which crushed heterogeneous rocks and debris have accumulated (Fig. 2). A multidisciplinary study, started in 1996, allowed significant advances in conceptual and mechanical modelling of the earthflow [6]. A preliminary geophysical interpretation [13] also helps designing its main structures. We presents here new results from complementary geophysical measurements consisting of two seismic refraction profiles, two electrical resistivity profiles, and a topographic survey using a DGPS.

The seismic profiles were performed along two orthogonal directions: a 325 m transverse (F) profile perpendicular to the axis of the earthflow (along line C on Fig. 1B), and a 235 m longitudinal (G) profile (Fig. 1B). A total of 66 geophones placed at a 5 m interval were used for the transverse profile. Shots were fired using a detonating cord, at a 15 m interval. Data processing and inversion of the first arrival traveltimes were undertaken using the JaTS seismic tomography software [3]. This code uses Fresnel volumes to compute wavepaths and a Simultaneous Iterative Reconstruction Technique (SIRT), reformulated according to a probabilistic approach, to estimate the P-wave velocity field. A L_2 norm likelihood function is computed for each iteration for estimating the convergence of the process. Velocities in the earthflow were inverted along both the transverse (Fig. 3) and longitudinal profiles, and vary from 300 to 2400 m s^{-1} according to three layers, as already established from previous seismic refraction studies [12] and geotechnical sounding [10]: a surficial layer with low velocities ranging from 300 to 600 m s^{-1} (C1), a sec-

ond layer with velocities ranging from 900 m s⁻¹ to 1200 m s⁻¹ (C2), and finally the marly bedrock, well defined by a transition zone, with high velocities ranging from 2100 to 2400 m s⁻¹. On the transverse profile, the velocities on the mountain flanks remain high (1500 to 2500 m s⁻¹).

Two electrical resistivity profiles were also performed in conjunction with the seismic profiles: a 316 m transverse profile with 80 electrodes at a 4-m interval, and a 315 m longitudinal profile with 64 electrodes at a 5-m interval. A total of 1026 and 650 data points were collected for the transverse and longitudinal profiles, respectively. Data processing and inversion were undertaken according to Loke [5] implementing a damped least-squared Gauss–Newton algorithm. The transverse profile (Fig. 4) exhibits a strong contrast in the resistivity pattern before and after the 150 m mark, corresponding to the transition between the mountain flank and the earthflow. Within the earthflow itself, the model distinguishes two layers, a highly conductive surficial layer with contrasted resistivity values ranging from 3 to 20 Ω m [13], and an underlying layer with average resistivity values.

We will base our discussion on the transverse profile only, as it clearly reveals the complex behaviour of the earthflow. From the seismic model (Fig. 3), three distinct layers can be distinguished, with velocities increasing with depth, reflecting the increasingly compact nature of the strata down to the easily distinguishable marly bedrock. The electrical resistivity imaging results (Fig. 4a) show two layers with resistivity values increasing with depth (C1–C2): a bowl-shaped surficial layer, which can be identified on the seismic profile, with low resistivity values ranging from 12.6 to 25.1 Ω m, and the bedrock, with resistivity values ranging from 4.5 and 12.2 Ω m. In order to go beyond a qualitative comparison between both data sets, a number of vertical sections were produced along the inverted horizontal profiles. For each vertical section, both the vertical gradient of the velocity and the logarithm of the resistivity were calculated. The results were then plotted on a graph (Fig. 5). On this graph the results of the vertical sections located on the mountain flanks are represented by black symbols, corresponding to the first 115 m of the profile, and green symbols, corresponding to the last 25 m of the profile (275–300 m). The black symbols plot relatively close together, apart from a few dispersed points that may reflect a change in the lithology or state of the rock (weathered rocks, for example). The green symbols also appear to be well grouped. This clustering probably reflects a homogeneous lithology little affected by weathering and stable

in situ blocks, concurring with previous observations of the flanks of the earthflow. Between these points (from 125 to 265 m along the profile), three behavioural classes can be distinguished, indicated by blue, yellow, and red symbols on the graph, that result in two types of variation within the strata. One is related to the degree of mechanical porosity induced by fracturing, and the other to the degree of water saturation of this porous environment. Indeed, the increase in the V_p values from 500 to 2300 m s⁻¹ appears to be related to a decrease in fracture density with depth. The fracturing is linked to the deformation undergone by soil and rock material during the landslide, with this being more pronounced near the surface. The second noticeable variation is the high dispersion in the resistivity log data (1.2 to 2.4 Ω m) for the low velocity values, corresponding to the surficial stratum. For the higher velocity values, corresponding to deeper strata, the resistivity values tend towards an average value of 1.8 Ω m, which is in accordance with a decrease in the fracture density with depth. The various trends observed in the distribution of the data points for a specific elevation demonstrate that this behaviour varies laterally, as does the surface water content. This is due to the topography inducing a drainage pattern towards the ravines and away from the consequently dryer crests. It would seem, therefore, that the effect of surface fracturing differs, depending on whether the soil is saturated or not, or, in other words, whether the fractures are located along the ravines or the crests (Fig. 6). The immediate prospects of this study would be to identify a theoretical law linking acoustic velocity and electrical resistivity, enabling an explanation for the mechanical behaviour of the earthflow as presented in this article. The inversion of two geophysical parameters would consequently become an inversion of lithological behaviour, depending on the petrophysical properties.

1. Introduction

Cette étude a pour but de caractériser la structure interne et l'état hydrique de matériaux argilo-marneux affectés par des glissements de terrain, à partir de paramètres géophysiques tels que la vitesse de propagation V_p et la résistivité électrique ρ . Notre étude s'applique sur le site complexe du glissement-coulée de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France) représentatif des mouvements gravitaires à comportement visqueux.

Les glissements-coulées lents sont des phénomènes complexes dans lesquels des masses de matériaux cohésifs (texture granulométrique fine) progressent lentement : (i) par un mécanisme de glissement le long de

53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104

1 surfaces de cisaillements discrètes [2,4]; (ii) par une
2 déformation continue et différenciée [1,6] dont l'ampli-
3 tude dépend des conditions locales de contraintes et de
4 la forme de la topographie recouverte.

5 Ils présentent une morphologie caractéristique de
6 langue boueuse, hétérogène et plus ou moins saturée
7 d'eau. Ces phénomènes peuvent être classiquement di-
8 visés en trois unités spatiales distinctes : (i) une zone
9 d'ablation à l'amont, qui présente une morphologie de
10 détail caractéristique associant un escarpement princi-
11 pal et à son pied des chaos de blocs ; (ii) une zone de
12 transit, dans la partie intermédiaire, qui prend l'allure
13 d'une coulée étirée, qui fossilise un (ou plusieurs) che-
14 nal d'écoulement long, étroit et pentu ($>20^\circ$) ; (iii) une
15 zone d'accumulation à la base du versant, qui prend la
16 forme d'un ou plusieurs lobes étagés et raides.

17 Ces glissements-coulées présentent des vitesses très
18 variables, comprises en moyenne entre 0,005 et
19 $0,3 \text{ m j}^{-1}$. Ce mouvement continu (aucune phase d'ar-
20 rêt) peut être maintenu sur de longues distances (hec-
21 tométriques à kilométriques) et périodes de temps
22 (>100 ans) par la combinaison de déformations de
23 fluage (continues dans le temps) et de déformations
24 plastiques (épisodiques), en fonction des variations des
25 pressions interstitielles. La combinaison d'une faible
26 résistance mécanique (résiduelle) des matériaux et de
27 conditions d'alimentation en eau variable explique la
28 cinématique saisonnière. Les glissements-coulées pré-
29 sentent en surface un système complexe de fissures
30 qui sont des zones de faiblesses hydrologique et mé-
31 canique qu'il convient de caractériser pour comprendre
32 le comportement physique de ces phénomènes. En effet,
33 l'amplitude des accélérations va dépendre de l'augmen-
34 tation des pressions interstitielles et de leur dissipation,
35 eux même contrôlées par les caractéristiques géoméca-
36 niques du matériau et par la densité de fissuration [9].

37 Les méthodes non intrusives de la géophysique,
38 telles que la tomographie sismique ou l'imagerie élec-
39 trique, sont adaptées à l'étude de ces paramètres. En
40 effet, elles permettent d'obtenir les caractéristiques pé-
41 trophysiques d'un matériau par inversion des données
42 mesurées. Dans notre cas, ce sont les temps de trajet
43 en sismique et les résistivités apparentes en électrique
44 qui constituent nos observations. L'inversion permet
45 d'obtenir deux modèles distincts : le champ de vitesse
46 acoustique, qui rend compte de l'état de porosité des
47 matériaux et la distribution des résistivités électriques,
48 qui renseigne sur les variations de teneurs en eau ou
49 en argile. À partir de ces modèles, la corrélation des
50 deux paramètres V_p et ρ est étudiée, afin de vérifier s'il
51 est possible de dégager des comportements caractérisés

53 par une relation entre vitesses acoustiques et résistivités
54 électriques.

56 2. Le site d'étude : le glissement-coulée de 57 Super-Sauze

58 Le site de Super-Sauze a été choisi pour cette étude,
59 car il représente un observatoire naturel (aucun ouvrage
60 de mitigation) suivi et instrumenté depuis 1996 [10]. Il
61 est représentatif de plusieurs glissements-coulées lents
62 similaires observés dans les Alpes françaises, comme
63 les glissement-coulées de La Valette, de Poche, de
64 Boulc ou des Dourbes. Le glissement-coulée se situe
65 dans le bassin de Barcelonnette sur la rive gauche de
66 l'Ubaye [11]. Il s'étend sur une longueur de 820 m,
67 entre les altitudes 2105 m à la couronne et 1740 m au
68 pied de la coulée pour une pente moyenne de 25° et une
69 superficie de 17 ha (Fig. 1).

70 Le glissement-coulée s'est déclenché dans les marnes
71 noires callovo-oxfordiennes, connues sous le nom de
72 « Terres Noires », présentant un faciès de schistes argi-
73 leux noirs, gris ou légèrement bleutés. Les blocs et les
74 panneaux qui se détachent de la couronne, de manière
75 rétrogressive, par des ruptures planes [8], s'accumu-
76 lent en se disloquant dans une ou plusieurs ravines,
77 et forment, après leur déstructuration progressive, une
78 coulée de débris à granulométrie hétérogène (Fig. 2).
79 Le bassin torrentiel emprunté par la coulée présente
80 une allure dissymétrique : le versant oriental, aux pentes
81 moyennes (20°), est constitué d'une couverture morai-
82 nique épaisse (jusqu'à 10 m) identifiée par sondages
83 géotechniques et recouvrant le substrat marneux princi-
84 palement dans la partie amont [6]. Le versant occidental
85 est plus pentu ($>30^\circ$) et constitué uniquement par le
86 substrat marneux.

87 Depuis 1996, une étude multidisciplinaire de ce site a
88 permis de proposer un modèle conceptuel de fonction-
89 nement et de valider plusieurs modèles numériques de
90 comportement [6]. Les investigations ont associé une
91 analyse géomorphologique couplée à un traitement pho-
92 togrammétrique, une prospection géotechnique (son-
93 dages et essais in situ et en laboratoire) et une inves-
94 tigation géophysique préliminaire [12,13]. Ces mesures
95 ont permis de définir la position et la forme de la topo-
96 graphie recouverte ainsi que la structuration verticale et
97 latérale de la coulée [10]. Dans le cadre de cette étude,
98 plusieurs types de mesures géophysiques complémen-
99 taires ont été réalisées sur le site : deux profils de sis-
100 mique réfraction et d'électrique, ainsi que des relevés
101 topographiques à l'aide d'un DGPS. Le protocole d'ac-
102 quisition et les traitements effectués sont détaillés dans
103 la section suivante.

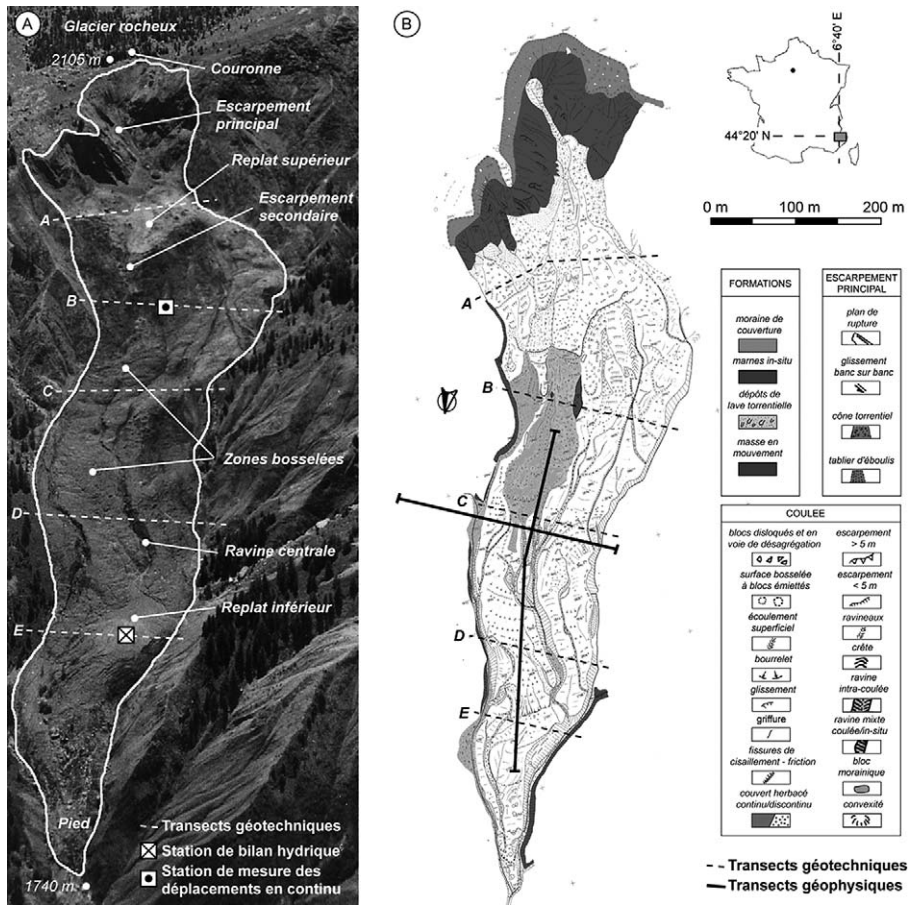


Fig. 1. Photographie aérienne oblique du glissement-coulée de Super-Sauze et localisation des transects d'investigation géotechnique et géophysique.

Fig. 1. Oblique aerial photograph of the Super-Sauze earthflow and location of the geotechnical and geophysical cross-sections.

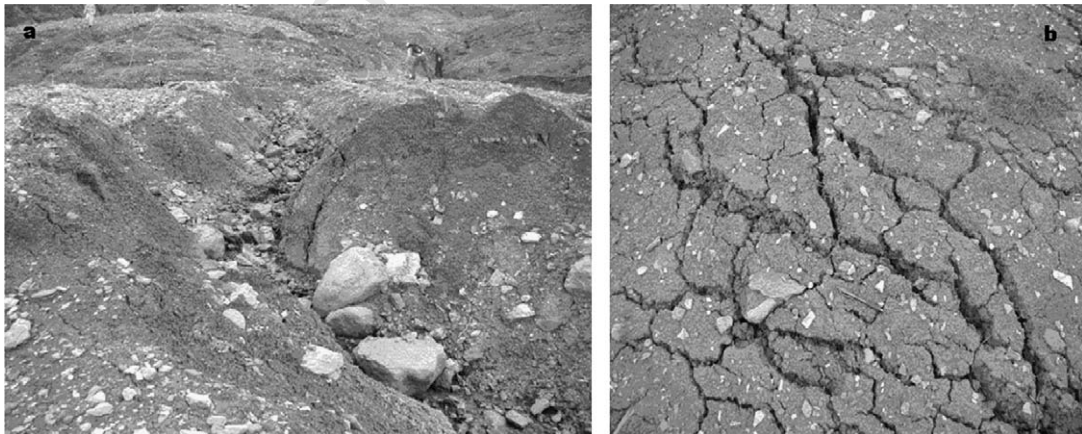


Fig. 2. (a) Accumulation de débris hétérogènes dans une ravine ; (b) fractures superficielles.

Fig. 2. (a) Accumulation of heterogeneous debris in a gully; (b): surficial cracks.

3. Tomographies géophysiques : protocole d'acquisition et traitement des données

Deux profils sismiques ont été réalisés dans la zone de transit, l'un (F) transverse à la coulée, proche du transect géotechnique C (Fig. 1b) d'une longueur totale de 325 m, et l'autre (G) dans la direction de la plus grande pente du glissement-coulée, sur une longueur de 235 m. Pour le profil transverse : 66 géophones 10 Hz ont été placés tous les 5 m. Dix-neuf tirs au cordon détonant (100 g), espacés de 15 m, ont été effectués. Un système dit de « roll-along » a permis de déplacer virtuellement la flûte pour n'enregistrer que les 48 traces disponibles sur un sismographe de type Geometrics StrataVizor. Le traitement des données sismiques par inversion des premiers temps d'arrivée a été réalisé grâce au logiciel de tomographie sismique JaTS [3]. Ce dernier permet d'estimer le champ de vitesse acoustique grâce à un algorithme de reconstruction algébrique de type SIRT (*Simultaneous Iterative Reconstruction Technique*). La spécificité de JaTS réside en premier lieu dans l'approche probabiliste qui a permis de reformuler le SIRT de façon à la rendre plus stable. Le poids donné à chaque mise à jour du champ de vitesse est ainsi justifié par la probabilité qu'une observation en soit responsable. La fonction « objectif », calculée à chaque itération pour estimer la convergence utilise la norme L_2 . Le deuxième point concerne l'utilisation des volumes de Fresnel dans le calcul des temps de trajet : à l'inverse des rayons, cette modélisation des trajets sismiques a l'avantage de prendre en compte la résolution de l'onde, dépendant elle-même de la fréquence.

Deux profils de panneau électrique ont été réalisés conjointement aux profils sismiques. Le profil trans-

verse (316 m) était composé de 80 électrodes espacées de 4 m. Un total de 1026 et de 650 mesures a été collecté respectivement pour le profil transverse (F) et le profil longitudinal (G). Les données ont été traitées puis inversées par la méthode de Loke [5]. Classiquement utilisée par le biais du logiciel RES2DINV, cette technique est basée sur une inversion par moindres-carrés amortis de type Gauss-Newton. Le problème direct est résolu en intégrant l'équation de Poisson par différences finies.

Sur la coulée, les deux tomographies sismiques indiquent des vitesses sismiques qui varient de 300 à 2400 m s^{-1} . Un modèle vertical de vitesses en trois couches est identifié (Fig. 3) : une première couche superficielle, aux vitesses faibles, comprises entre 300 et 600 m s^{-1} ; une deuxième couche avec des vitesses comprises entre 900 et 1200 m s^{-1} et enfin, le socle marneux, bien délimité par une couche intermédiaire peu épaisse, avec les vitesses les plus élevées, de 2100 à 2400 m s^{-1} . Cette structuration verticale des vitesses sismiques, identifiée par sismique réfraction dans Schmutz [12], correspond à la structure géotechnique proposée par Maquaire et al. [10], qui associe, de la surface vers la profondeur, (i) une couche géotechnique C1a-b de matériaux argilo-marneux remaniés, lâches, relativement peu consolidés et semi-perméable d'un point de vue hydrologique [6] ; (ii) une couche géotechnique C2 de matériaux remaniés, consolidés et imperméables ; (iii) le substrat marneux. Sur les versants, les vitesses sismiques sont importantes (1500 à 2500 m s^{-1}), et bien différenciées de celles observées pour les matériaux de la coulée.

La tomographie électrique réalisée sur le profil transverse (Fig. 4) indique un fort contraste de résistivité

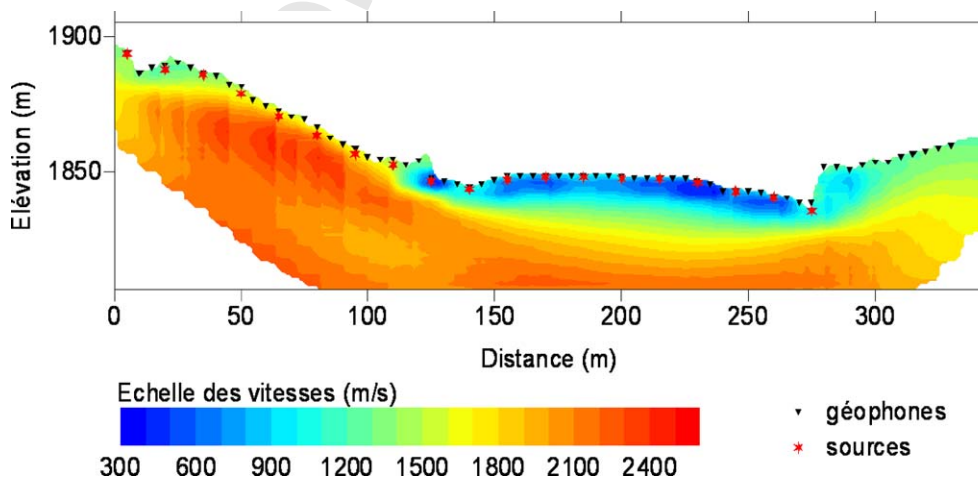


Fig. 3. Modèle de champ de vitesse obtenu à partir de l'inversion des temps de trajet des premières arrivées au bout de cinq itérations.

Fig. 3. Velocity field model obtained from first-arrival traveltimes inversion after five iterations.

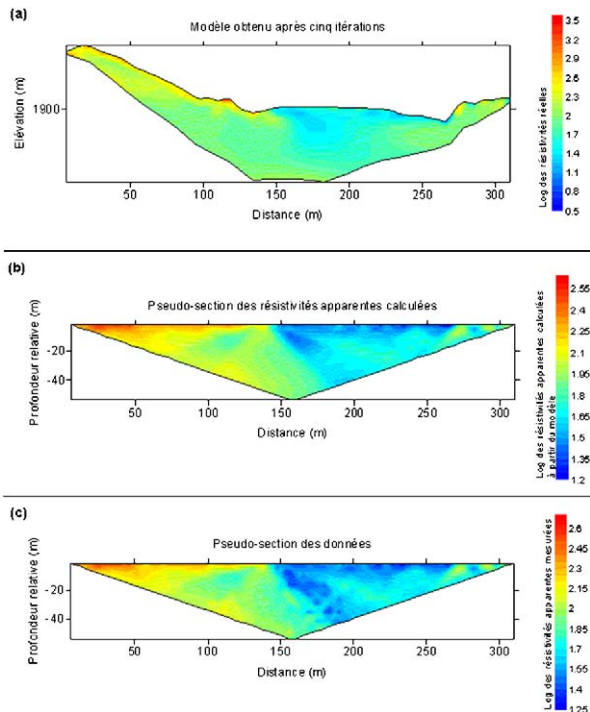


Fig. 4. (a) Modèle des résistivités réelles obtenu au bout de cinq itérations; (b) pseudo-section des résistivités apparentes calculées; (c) pseudo-section des résistivités apparentes mesurées.

Fig. 4. (a) True resistivity model obtained after five iterations; (b) calculated apparent resistivity pseudo-section; (c) measured apparent resistivity pseudo-section.

entre le versant stable, taillé dans des moraines quaternaires, et les matériaux de la coulée. Sur ce dernier, un modèle vertical de résistivités en deux couches peut être identifié : un matériau très conducteur en surface (3 à 20 Ω m) est superposé à un matériau moyennement résistif. Ces résultats confirment la grande variabilité des résistivités électriques de la coulée, qui s'explique principalement par le contexte structural [12]. L'extension des profils sur les flancs, au-delà des limites de la coulée, met en évidence un comportement électrique beaucoup plus résistif. Ceci démontre l'efficacité des méthodes électriques pour délimiter les zones en mouvement dans ce contexte.

4. Discussion : corrélation sismique-électrique

Dans cette section, la discussion porte uniquement sur le profil transverse qui illustre le comportement complexe du glissement-coulée. Le modèle sismique (Fig. 3) présente trois couches distinctes, caractérisées par des vitesses croissantes avec la profondeur, qui correspondent aux deux couches géotechniques C1–C2, constituées de matériaux compactés avec la profondeur,

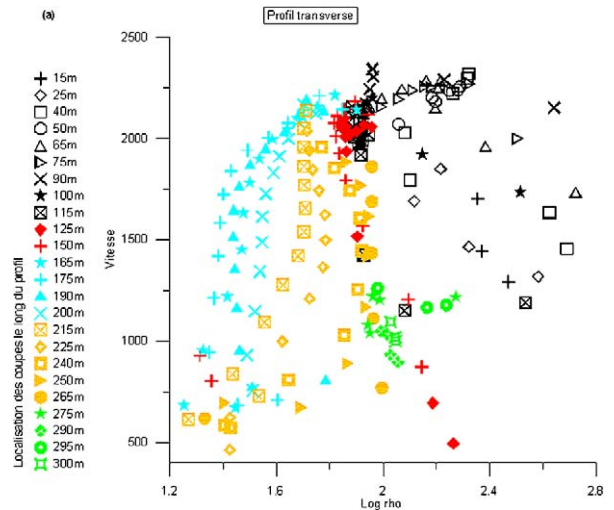


Fig. 5. Vitesse V_p en fonction de la résistivité électrique ρ pour différentes coupes verticales effectuées le long du profil transverse.

Fig. 5. Velocity V_p versus electrical resistivity ρ for several vertical sections selected along the horizontal transverse profile.

et au substrat marneux parfaitement délimité. L'imagerie électrique (Fig. 4a) indique deux couches de résistivités croissantes. La couche superficielle présente une forme de cuvette que l'on identifie également sur l'imagerie sismique.

Afin de comparer plus que qualitativement ces deux sources de données, plusieurs coupes verticales, le long des profils inversés, ont été réalisées. Pour chaque coupe, les gradients verticaux de la vitesse et du logarithme de la résistivité électrique ont été extraits, et représentés sur le graphe de la Fig. 5. Celle-ci indique que, sur les 115 premiers mètres du profil, qui correspondent au versant stable recouvert sur des épaisseurs de quelques mètres par des matériaux morainiques, les points (noirs) sont relativement regroupés. Les quelques points dispersés peuvent traduire un changement de lithologie (substrat marneux sous la couverture morainique) ou l'hétérogénéité de la couverture morainique (formation composée de blocs hétérométriques noyés dans une matrice limono-sableuse).

Sur les 25 derniers mètres du profil (à partir de l'abscisse 275 m), les points (en vert) sont également bien regroupés. Ceci traduit la présence d'une lithologie homogène (substrat marneux) avec peu de niveaux d'altération, et correspond aux observations géomorphologiques réalisées sur le versant ouest du bassin torrentiel. Entre ces versants (des abscisses 115 m à 275 m), trois comportements matérialisés par les points bleus, jaunes et rouges, sont observés. Ces comportements traduisent deux types de changement d'état, au sein du matériau remanié. Ils peuvent être mis en relation avec la densité

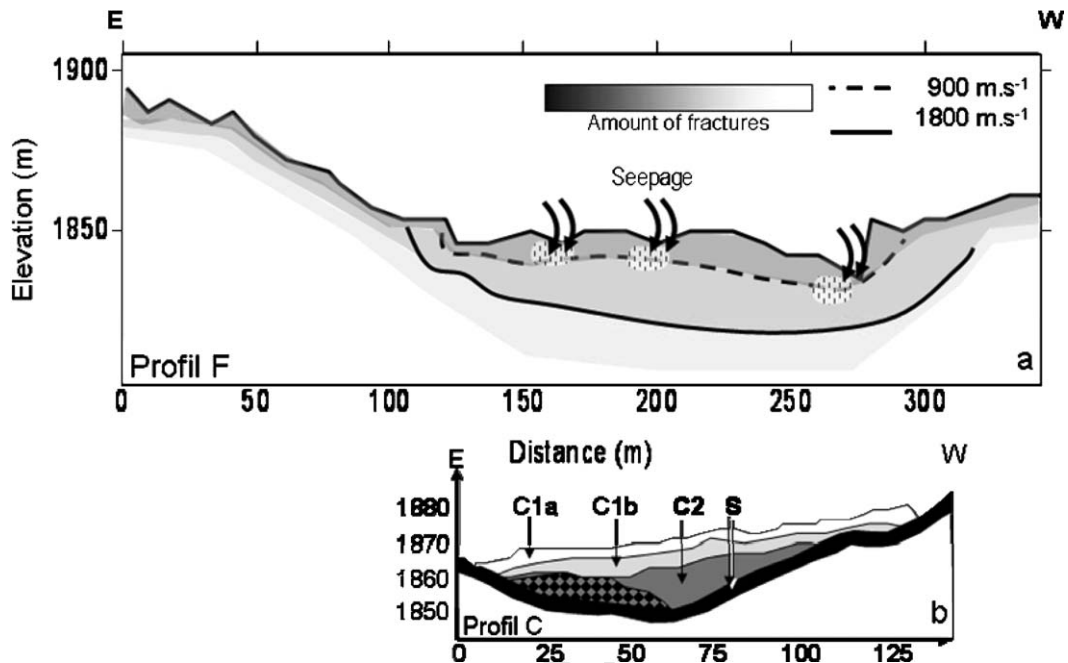


Fig. 6. (a) Coupe schématique du profil transversal montrant la distribution des fissures sur les flancs et le glissement-coulée, ainsi que les zones d'infiltration situées dans le fond des ravines ; (b) coupe géotechnique identifiant les couches de la coulée (C1a et C1b), les anciennes coulées (C2) et le matériaux en place (S) d'après Malet [6].

Fig. 6. (a) Schematic vertical section of the transverse profile showing the distribution of fissures throughout the flanks and the earthflow, and the water saturated zones linking gullies and upper groundwater; (b) geotechnical cross-section identifying the two active layers of the earthflow (C1a and C1b), the old one (C2) and the basement (S) from Malet [6].

de fissuration créant une porosité mécanique d'une part, et avec le degré de saturation en eau du milieu poreux d'autre part. Ainsi l'évolution croissante de la vitesse de propagation V_p de 500 m s^{-1} à 2300 m s^{-1} semble liée à la diminution de la densité de fissuration avec la profondeur. En effet, l'existence de tensions distribuées verticalement au sein de la masse se traduit par une densité de fissuration plus importante en surface [7].

Le deuxième changement remarquable est le degré de dispersion du log de la résistivité ($1,2$ à $2,4 \Omega \text{ m}$) pour les faibles vitesses sismiques (matériau de la couche superficielle C1). Pour les vitesses sismiques plus élevées (matériau de la couche profonde C2), les résistivités tendent vers une valeur moyenne de $1,8 \Omega \text{ m}$, ce qui est en accord avec une diminution de la densité de fissuration en fonction de la profondeur. Les différentes tendances de la distribution des valeurs, pour une cote donnée, montrent que le comportement varie latéralement. Or, une variation latérale de l'état hydrique est observée à l'échelle de la coulée. Celle-ci provient de la topographie du site, qui draine les eaux météoriques vers les ravines, et a tendance à assécher les crêtes [9]. Il semblerait donc que l'influence des fissures présentes en

surface est différente suivant qu'elles sont saturées ou pas (Fig. 6).

Les perspectives immédiates de cette étude sont de trouver une loi théorique d'évolution de la vitesse sismique et de la résistivité en fonction de l'état géomécanique des matériaux qui permettrait de retrouver les comportements observés. Des lois empiriques existent – comme par exemple la loi d'Archie ou la loi de Wylie – qui relient respectivement la résistivité électrique et la vitesse sismique à la porosité. Dans ce cadre, une étude de laboratoire sur échantillons pourrait être envisagée pour obtenir des informations plus précises sur les variations de la vitesse en fonction de la porosité et de l'argilosité par exemple. Ainsi, il serait possible de relier la vitesse et la résistivité par une loi applicable à ce type de matériau et d'objet et donc d'effectuer non plus une inversion séquentielle de ces deux paramètres, mais une inversion de comportement géomécanique à partir des caractéristiques géophysiques. Dans cette perspective, d'autres investigations géophysiques conjointes sismique-électrique, sur différents sites et pour différents matériaux, devront aussi être réalisées pour constituer une base de données statistique permettant de définir cette loi.

5. Conclusion

Cette étude avait pour but de caractériser la structure interne et l'état hydrique du glissement-coulée de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France) à partir de la vitesse de propagation V_p et de la résistivité électrique ρ . La coulée se situe dans les « Terres Noires » du Callovo-Oxfordien et se compose de matériaux argilo-marneux remaniés, hétérogènes, très fissurés et plus ou moins saturés en eau. Ce contexte rend ce site représentatif des mouvements gravitaires à comportement visqueux. Des mesures de tomographie sismique et électrique ont été réalisées et étudiées le long d'un profil transverse à la coulée. Le traitement a consisté à inverser les temps de trajet des premières arrivées sismiques et les valeurs de la résistivité apparente afin de produire des images de la vitesse acoustique et de la résistivité électrique le long de ces profils. Elles révèlent une structure composée de deux couches de matériaux déplacés superposées au substratum marneux au droit de la coulée ; les versants du bassin torrentiel s'individualisent nettement de part et d'autre de la coulée. La corrélation des valeurs de la vitesse acoustique en fonction de la résistivité électrique, relevées à différentes abscisses le long des profils, met en évidence plusieurs comportements rhéologiques, chacun relié à l'état de fissuration et à la saturation en eau du milieu. On caractérise ainsi les versants et le substratum comme des niveaux homogènes et stables, alors que la coulée révèle des zones plus ou moins fissurées en fonction de la profondeur et plus ou moins saturées en eau en fonction des écoulements de surface guidés par la présence de ravines.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet ACI CatNat SAMOA « Surveillance et Auscultation de MOuvements gravitaires Alpains » (coordinateurs : C. Delacourt, O. Maquaire, D. Amitrano) et financé partiellement par la direction de la recherche du BRGM. Les auteurs remercient A. Remaître et D. Moreno, qui ont participé à la mission d'acquisition sur le site.

Références

- [1] R.L. Baum, J. Messerich, R.W. Fleming, Surface deformation of slow-moving, clay-rich landslides, Honolulu, Hawaii, Environ. Eng. Geosci. 4 (1998) 283–306.
- [2] D. Brunsden, M.L. Ibsen, in: R. Dikau, D. Brunsden, L. Schrott, M.L. Ibsen (Eds.), *Landslide Recognition: Identification, Movement and Causes*, Wiley, Chichester, UK, 1996, pp. 103–119.
- [3] G. Grandjean, S. Sage, JaTS: a fully portable seismic tomography software based on Fresnel wavepaths and a probabilistic reconstruction approach, Comput. Geosci. 30 (2004) 925–935.
- [4] O. Hungr, S.G. Evans, M.J. Bovis, J.N. Hutchinson, A review of the classification of landslides of the flow type, Environ. Eng. Geosci. 7 (2001) 221–238.
- [5] M.H. Loke, The inversion of two-dimensional resistivity data, PhD thesis, University of Birmingham, Birmingham, UK, 1994 (122 p.).
- [6] J.-P. Malet, O. Maquaire, S. Klotz, The Super-Sauze flowslide (Alpes-de-Haute-Provence, France): triggering mechanisms and behaviour, in: Proc. VIIIth Int. Symp. on Landslides, vol. 2, Thomas Telford, Cardiff, 2000, pp. 999–1006.
- [7] J.-P. Malet, Les « glissements de type écoulement » dans les marnes noires des Alpes du Sud. Morphologie, fonctionnement et modélisation hydro-mécanique, thèse de doctorat de sciences de la Terre, université Louis-Pasteur, Strasbourg-1, France, 2003 (394 p. + annexes).
- [8] J.-P. Malet, O. Maquaire, Black marl earthflows mobility and long-term seasonal dynamic in southeastern France, in: L. Picarelli (Ed.), Proc. Int. Conf. on Fast Slope Movements: Prediction and Prevention for Risk Mitigation, Napoli, Italy, Patron Editore, Bologne, Italie, 2003, pp. 333–340.
- [9] J.-P. Malet, Th.W.J. Van Asch, R. Van Beek, O. Maquaire, Forecasting the behaviour of complex landslides with a 2–5D spatially distributed hydrological model, Nat. Hazards Earth System Sci. 5 (1) (2005) 71–85.
- [10] O. Maquaire, J.-C. Flageollet, J.-P. Malet, M. Schmutz, D. Weber, S. Klotz, Y. Albouy, M. Desclôîtres, M. Dietrich, R. Guérin, J.-J. Schott, Une approche multidisciplinaire pour la connaissance d'un glissement-coulée dans les marnes noires du Callovo-Oxfordien (Super-Sauze, Alpes de Haute-Provence, France), Rev. Fr. Géotech. 95–96 (2001) 15–31.
- [11] O. Maquaire, J.-P. Malet, A. Remaître, J. Locat, S. Klotz, J. Guillon, Instability conditions of marly hillslopes, towards landslide or gully? The case of the Barcelonnette basin, South East France, Eng. Geol. 70 (2003) 109–130.
- [12] M. Schmutz, Apport des méthodes géophysiques à la connaissance des glissements-coulées développés dans les marnes noires. Application à Super-Sauze, thèse, université Louis-Pasteur, Strasbourg-1, 2003 (214 p.).
- [13] M. Schmutz, Y. Albouy, R. Guérin, O. Maquaire, J. Vassal, J.-J. Schott, M. Desclôîtres, Joint electrical and time domain electromagnetism (TDEM) data inversion applied to the Super-Sauze earthflow (France), Surv. Geophys. 21 (2000) 371–390.

53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

63

64

65

66

67

68

69

70

71

72

73

74

75

76

77

78

79

80

81

82

83

84

85

86

87

88

89

90

91

92

93

94

95

96

97

98

99

100

101

102

103

104

105