

TOMOGRAPHIE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE 3D POUR COMPRENDRE LA STRUCTURE ET LE CONTROLE HYDROGEOLOGIQUE DE L'INSTABILITE GRAVITAIRE DE VIELLA

LAJAUNIE M.^{1,2}, GANCE J.³, LEITE O.³, TRUFFERT C.³, MAILLARD O.⁴, BERTRAND C.⁴, MALET J.-P.^{1,2}

¹ ITES – Institut Terre Environnement Strasbourg, CNRS/Université de Strasbourg, jeanphilippe.malet@unistra.fr

² EOST – Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, CNRS/Université de Strasbourg, France, jeanphilippe.malet@unistra.fr

³ IRIS Instruments, Orléans, France, j.gance@iris-instruments.com

³ THETA, Besançon, France, catherine.bertrand@univ-fcomte.fr

RESUME

Le village de Viella (Hautes-Pyrénées) est affecté par un aléa gravitaire fortement influencé par l'hydrogéologie, qui endommage progressivement certaines infrastructures du village avec une accélération notable depuis 2018. Une tomographie de résistivité électrique 3D a été réalisée avec le système FullWaver, pour permettre une caractérisation structurale et hydrogéologique du versant. Le modèle 3D de résistivité met en évidence une importante variabilité spatiale jusqu'à 100 à 150 m environ, en adéquation avec la dynamique de déformation et les observations hydrogéologiques.

Mots clés : *glissement de terrain de Viella – ERT 3D - géophysique structurale – hydrogéophysique*

3D ERT TO UNDERSTAND THE STRUCTURE AND HYDROLOGY OF THE VIELLA LANDSLIDE

ABSTRACT

The village of Viella, in the Hautes-Pyrénées, is affected by strong slope movement controlled by the hydrogeology of the site. As a consequence, houses and infrastructures are progressively damaged since 2018. A 3D dense electrical resistivity tomography was realized using the FullWaver system, to help characterizing the structure and the hydrogeology of the slope. The produced 3D resistivity model presents a high spatial variability until 100 to 150 m depth approximately, that highly relates to the complex strain dynamics of the slope and the hydrogeological observations.

Key words: *Viella landslide – 3D ERT - landslide structure – landslide hydrogeology*

INTRODUCTION

Depuis de nombreuses années, le village de Viella, dans les Hautes Pyrénées, est sujet à des instabilités gravitaires de plusieurs types. A la suite d'un éboulement de grande ampleur (ca. 100 000 m³) survenu en avril 2018 en amont du village, certaines zones du versant ont montré des vitesses de glissement accrues. Des compartiments géodynamiques sont apparus causant un endommagement important de maisons et d'infrastructures, ainsi qu'une dégradation continue de la route d'accès et de son pont. Ces déformations de glissement s'ajoutent à un aléa de chutes de blocs et de coulées de boues.

Cette structuration complexe est probablement liée à d'importantes variations multi-dimensionnelles de la lithologie, essentiellement constituée de schistes plus ou moins altérés, de dépôts d'écroulements anciens et d'alluvions, de la déformation structurale et du degré d'altération. De toute évidence, les écoulements d'eau dans le versant se font au bénéfice d'un ensemble de chenaux préférentiels. Les écoulements et la répartition des stocks d'eau dans le sol semblent jouer un rôle important dans la dynamique du versant.

Afin de mieux comprendre la structure de ce versant instable ainsi que son hydrogéologie, les variations de résistivité électrique ont été étudiées en trois dimensions (3D) sur le secteur de Viella.

METHODE D'INVESTIGATION

Mesures de résistivité en réseau de capteurs

Les mesures 3D de résistivité ont été obtenues par enregistrement continu du potentiel électrique à partir d'un réseau de capteurs autonomes distribués régulièrement sur la zone d'étude. De tels dispositifs d'acquisition apportent une réelle liberté quant à l'étendue, la dimension et la résolution obtenue. Le système FullWaver s'adapte à de telles configurations grâce à l'enregistrement du potentiel sur les deux voies de mesures de chaque capteur unitaire (V-FullWaver). En disposant les trois électrodes de potentiel raccordées par un câble fin aux unités d'enregistrement de telle sorte à former deux dipôles orthogonaux, le système permet une mesure totale du champ électrique (Ex et Ey) ce qui apporte une sensibilité accrue aux objets 3D.

Dispositif de mesures employé à Viella

La zone investiguée couvre une superficie de 400 x 500 m², centrée autour du village de Viella. Elle est délimitée en amont par les dépôts de l'écroulement de 2018, et en aval par le lit du Bastan, le torrent de la vallée (cf. Fig. 1).

Le dispositif de mesures était constitué d'un réseau de 55 capteurs (V-FullWavers) installés de manière régulière sur la zone d'étude, chacun mesurant le différentiel du potentiel électrique sur deux dipôles orthogonaux de 25 m chacun. Ces capteurs étaient espacés d'une distance de 90 à 100 m, à l'exception de la zone du village, dans laquelle aucun capteur n'a pu être installé.

Les injections ont été réalisées à l'aide d'un émetteur de courant TIP6000 de forte puissance (6 kW, 16 A, 3000 V). Le dispositif d'injection était formé de deux électrodes fixes et de 235 électrodes mobiles, déplacées sur la zone d'étude. Les électrodes fixes ont été installées à l'est du glissement au minimum à 1 km de distance de la zone étudiée pour augmenter la profondeur d'investigation. La zone d'injection couvrait toute la zone d'étude avec une distance de 35 à 45 m entre les points d'injection, à l'exception de la zone du village, où aucune injection n'a pu être réalisée.

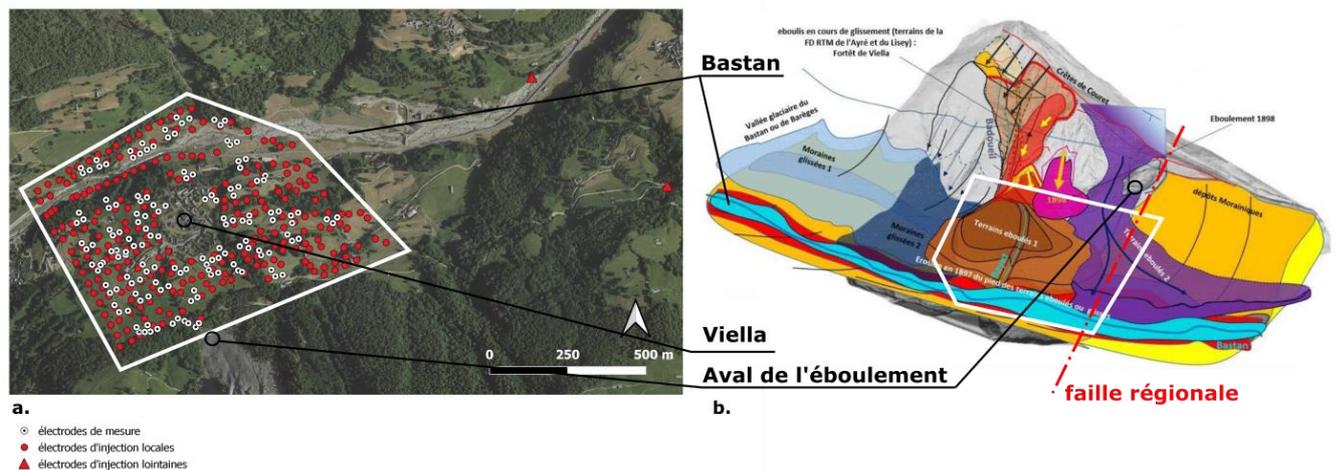


Fig. 1 – Dispositif de mesures à Viella (a) ; contexte de dépôts et contexte structural du versant (b)

Données obtenues et traitements

Lors de la campagne, une analyse permanente de la qualité des signaux a été réalisée grâce à un système de communication radio, permettant d'adapter les durées d'injection et de vérifier l'état de chaque capteur et les connexions des électrodes. Les données ont été analysées et filtrées *a posteriori*, selon les étapes suivantes : extraction des données, calcul d'une incertitude de mesure, suppression des données aberrantes vis-à-vis de critères tels que la distribution de résistivités apparentes dans le jeu de données, ou encore une grande incertitude de mesure. Au total, 23970 mesures ont été réalisées pendant la campagne de terrain, et après filtrage, 89 % des données mesurées ont été conservées soit 21407 données.

Inversion des données

Pour modéliser et inverser les données, un modèle numérique de terrain fin a été utilisé sur la zone étudiée, provenant d'acquisitions LiDAR aéroportées (15 pts/m²) réalisées sur le versant et le long du Bastan, permettant une description fortement résolue de la surface topographique. Un modèle numérique de terrain sous-échantillonné (résolution spatiale de 0.5 m) a été utilisé pour inverser les données. Les données ont été inversées avec deux outils d'inversion, reposant en particulier sur différentes méthodologies de calcul direct.

Le premier outil, ERTLab STUDIO (Morelli and Labrecque 1996), a été utilisé tout en discrétisant le milieu avec une grille extrêmement fine (832471 cellules) pour profiter au mieux de l'information de fine résolution portée par le jeu de données. En conséquence, une forte régularisation et un lissage ont dû être appliqués. Le second outil, BERT (Rücker et al. 2006, Günther et al. 2006), permet une description fine de la surface. Le maillage tétraédrique utilisé pour l'inversion est constitué de 59400 cellules de tailles variables, basées sur une estimation de la résolution locale du jeu de données, permettant de limiter la dimension de la grille de modélisation et d'inversion.

Les deux inversions ont convergé convenablement (**BERT** : $\chi^2 = 0.95$, 13 itérations ; **ERTLab** : écart absolu moyen = 2.32 %, $\chi^2 < 1$, 13 itérations) et ont produit des modèles fortement similaires, présentant les mêmes anomalies (en position et en dimension) et associant des valeurs de résistivité semblables. Certaines anomalies semblent toutefois présenter une géométrie plus finement résolue dans le modèle inversé par ERTLab (Fig.2), en lien avec la discrétisation spatiale très fine de la grille de calcul.

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

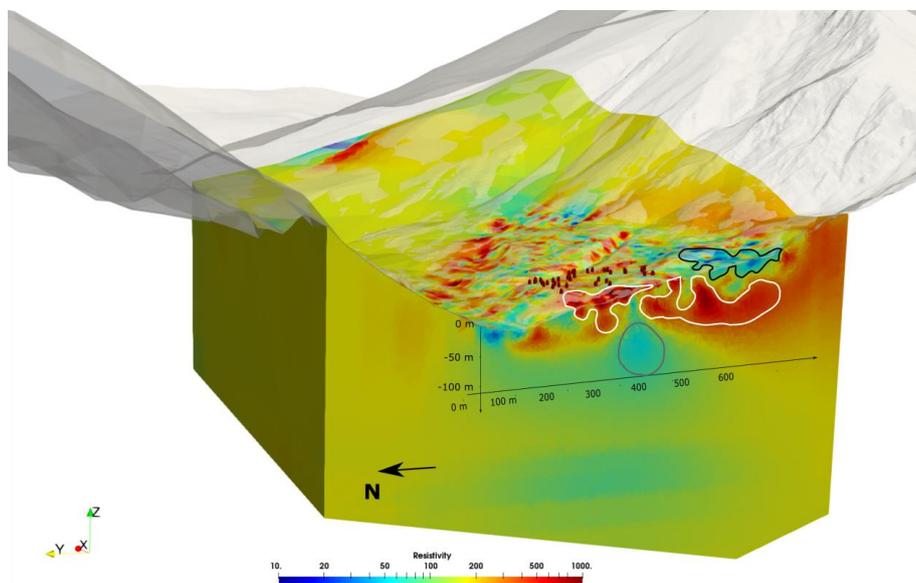


Fig. 2 –Bloc 3D de résistivité électrique du versant instable de Viella – section longeant le village par l'ouest - Modèle inversé par ERTLab. Les cubes rouges représentent les bâtiments endommagés, les zones encadrées correspondent aux anomalies résistives (blanc) et conductrices (noir et gris).

L'analyse des modèles permet de distinguer des objets résistants ($\rho > 400$ ohm.m) d'objets particulièrement conducteurs ($\rho < 100$ ohm.m) (cf. **Fig. 2**).

En amont du village, une anomalie conductrice de très proche surface (dans les 30 premiers mètres, encadrée en noir dans la **Fig. 2**) est attribuée à une zone saturée, dont en résulte un sol particulièrement humide, la présence de résurgences d'eau ainsi que la présence d'eau à moins de 6

m de profondeur dans les piézomètres de la zone. Le drainage de cette zone, selon qu'il ait lieu plus ou moins en profondeur, et qu'il génère des écoulements d'eau potentiellement intenses à l'aplomb du village, peut avoir une implication variable dans la dynamique des différents compartiments du glissement.

La partie Nord-Ouest du modèle présente, en profondeur, une grande zone conductrice (encerclée en gris) ainsi que de grandes structures résistantes s'étendant sur plusieurs centaines de mètres (encerclée en blanc), orientées du Nord-Ouest au Sud-Est et localisées à des profondeurs relativement importantes (50 à plus de 200 m). Ces structures bordent le village au Nord-Ouest et semblent s'aligner avec une unité constituée de calcaires massifs affleurant sur les versants sud et nord. Bien qu'une correspondance entre ces anomalies hectométriques et cette structure régionale soit avancée, on ne peut pas en présupposer du rôle hydrogéologique ni cinématique de cette dernière.

Les compartiments à forte activité cinématique ainsi que plusieurs habitations et infrastructures (pont d'accès au village) endommagées semblent liés à des structures de résistivité élevée, interprétées comme des volumes de roches consolidées en mouvement, fragilisés par les transferts de pression liés aux écoulements d'eau sous-jacents.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le modèle de résistivité 3D fournit des informations sur la structure et sur l'hydrogéologie. Il permet de mettre en évidence le lien entre les compartiments les plus actifs du glissement, et sa structure, et donne un premier aperçu du rôle local de structures de roches compactes sur l'hétérogénéité des déformations observées en surface (création de fissures dans les infrastructures, présence d'escarpements) et les circulations préférentielles d'eau entre ces structures consolidées et la profondeur. Cette première image 3D du versant servira de modèle structural de référence pour des travaux de modélisation hydrogéologique et géomécanique dans l'analyse des scénarii d'évolution du versant.

Remerciements

L'étude a été menée dans le cadre d'une mission d'expertise inter-établissement mandatée par la Préfecture des Hautes-Pyrénées et pilotée par les services de Restauration des Terrains de Montagne de l'Office National des Forêts. L'étude a également bénéficié de subventions de l'INSU dans le cadre des actions du Service National d'Observation OMIV (Observatoire Multi-disciplinaire des Instabilités de Versants). Les auteurs remercient K. Susanto, S. Benarioumlil, F. Vermeersch, L. Roux, V. Riglet, S. Le Moing pour leurs contributions aux mesures de terrain, et C. Bataillès et L. Lespine (RTM 64/65) pour les discussions autour du modèle de résistivité et l'aide quant à son interprétation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BATAILLES, C. et LESPINE, L., 2020 – Etude de Bassin de Risque de la Division Domaniale de Viella – Rapport du RTM – Hautes-Pyrénées.

GÜNTHER, T., RÜCKER, C., SPITZER, K., 2006 - Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography — II. Inversion, *Geophysical Journal International*, vol. 166, no 2, 506–517.

MORELLI, G. et LABRECQUE, D., 1996 - Advances in ERT inverse modeling. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, vol. 1, no 2, 171-186.

RÜCKER, C., GÜNTHER, T., SPITZER, K., 2006 - Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography — I. Modelling, *Geophysical Journal International*, vol. 166, no 2, 495–505.