

APPORT DU LOGICIEL PYMERI-3D POUR L'IMAGERIE DES SITES A GEOMETRIE ET GEOLOGIE COMPLEXE

CONTRIBUTION OF PYMERI-3D CODE FOR IMAGING SITES WITH COMPLEX GEOMETRY AND GEOLOGY

Sam TAOUM¹, Ahmed SAYDY¹, Cyrille FAUCHARD¹, Raphaël ANTOINE¹, Antoine TONNOIR², Yannick FARGIER³

¹ CEREMA, ENDSUM, Rouen, France

² INSA, Rouen, France

³ IFSTTAR, Bron, France

RÉSUMÉ – L'Imagerie de Résistivité Electrique (IRE) permet d'estimer la distribution de la résistivité électrique du sous-sol. Les logiciels conventionnels ne permettent pas une prise en compte des milieux avec une forte topographie ou géométrie telle que rencontrée en génie civil générant des artéfacts d'imagerie importants. Nous proposons un code open source innovant pour le traitement des données illustré par deux applications.

ABSTRACT – Electrical Resistivity Imagery (ERI) is a geophysical method used to estimate the distribution of electrical resistivity in the soil. Conventional softwares do not allow imaging environments with a strong topography or geometry. This issue generates significant imaging artifacts in the inversion result. We propose innovative open source python codes for data processing with two applications.

1.Introduction

L'Imagerie de résistivité électrique (IRE) est une méthode géophysique reconnue pertinente pour de nombreuses applications en géosciences (Portal et al., 2019), génie civil (Fargier et al., 2014) et archéologie (Fauchard et al., 2019). Cependant, jusqu'à récemment cette méthode se limitait surtout à traiter des problématiques issues de milieux ayant une topographie assez plane ou modérée. Ainsi la majorité des logiciels d'IRE sont généralement appliqués pour des cas où la topographie ne présente pas de fortes variations dans les trois directions de l'espace.

Nous présentons un nouveau code libre d'inversion 3D basé sur l'utilisation d'un ensemble de logiciels libres et de codes Python. L'objectif est de permettre l'utilisation de la technique ERI-3D sur des milieux très hétérogènes intégrant une géométrie ou topographie complexe. Cette étude propose deux cas d'études réels portant sur des problématiques différentes mais présentant à chaque fois des géométries complexes. La première concerne la caractérisation du site des Vaches Noires (Normandie) (Medjkane et al, 2019). Ce site à enjeu en raison du suivi du trait de côte présente à la fois une topographie complexe et une histoire géologique complexe. Le second site d'étude est un pilier de carrière souterraine à Saint-Martin-Le-Nœud remarquable de par la complexité de la géométrie de l'ouvrage ausculté.

Dans un premier temps nous présentons l'essence du code développé. Dans un second temps les résultats obtenus sur les deux sites sont présentés sans s'attarder sur l'interprétation des résultats mais plus sur les capacités d'imagerie nouvellement offertes par le code (Taoum et al., 2020a ; 2020b). En effet, les logiciels conventionnels (type Res2dinv) seraient mis en échec du fait des géométries des milieux auscultés. Ces

résultats soulignent également l'apport et la complémentarité des techniques photogrammétriques (outil en plein essor notamment grâce aux drones (Medjkane et al., 2019) pour l'obtention d'un MNT précis du milieu et pour l'interprétation des résultats d'imagerie obtenus (Fauchard et al., 2013).

2. Matériel et méthode

Afin de pouvoir obtenir un résultat d'imagerie, il est nécessaire de résoudre deux processus élémentaires que sont le problème direct et le problème inverse. Le premier permet de résoudre un problème de modélisation numérique et donc de générer des données à partir d'un modèle tandis que le second fait l'inverse ; Il reconstruit les paramètres d'un modèle à partir de données. Cependant, afin de pouvoir résoudre le problème direct, il est nécessaire d'avoir à sa disposition une géométrie close et maillée du milieu investigué.

2.1. Maillage du milieu

La photogrammétrie est une technique permettant de restituer la géométrie d'objets à partir d'un ensemble de photographies prises selon une procédure assez stricte (Pierrot-Deseilligny et al., 2012). Elle permet d'obtenir un Modèle Numérique de Terrain (MNT) sous forme d'un nuage de point.

La génération de volumes à partir de ces MNT est complexe (Gout et Le Guyader, 2006 ; Ozeré et al., 2015). Elle est devenue une étape essentielle pour la prospection et l'interprétation géophysique. Malheureusement, les outils disponibles pour le maillage des nuages de point sont aujourd'hui à la fois coûteux et inadaptés à notre problématique.

Nous proposons une méthode basée sur des logiciels libres : le logiciel MicMac (Pierrot-Deseilligny et Clery, 2012) est utilisé pour l'obtention de nuages de points, le logiciel Gmsh (Geuzaine et Remacle, 2009), pour la génération de maillages en 3D, et un ensemble de codes Python a été développé pour générer et optimiser les maillages de ces MNT. La construction d'un volume V représentant le sous-sol en profondeur à partir des données photogrammétriques du terrain, se fait en quatre étapes synthétisées sur le figure 1 :

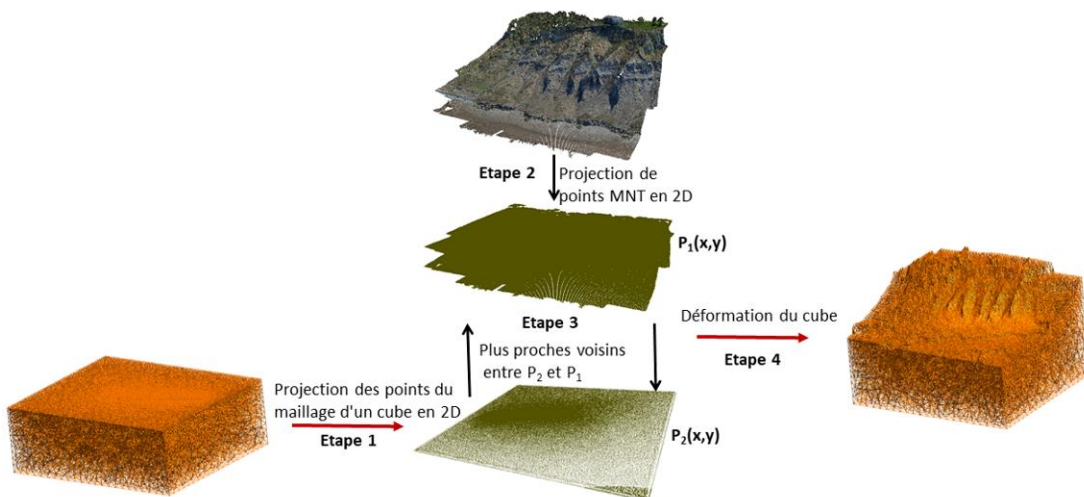


Figure 1. Différentes étapes du maillage d'un volume 3D basé sur un nuage de points.

Etape 1 : Projection des points MNT en 2D $P_1(x,y)$

Les données “brutes” issues du logiciel MicMac sont un ensemble de points de coordonnées $(x_i; y_i; z_i)$ $i=1\dots N$ où N est le nombre de points. Dans le cas d'une topographie très complexe (cf. applications), les variations en z sont très prononcées. La première étape consiste à projeter l'ensemble des points du nuage sur un plan en 2D, $P1(x, y)$. Un exemple de la projection en 2D est illustré sur la Figure 1.

Etape 2 : Projection des points du maillage d'un cube en 2D

On construit dans l'étape 2, un cube de dimension $[x_{min}, x_{max}] \times [y_{min}, y_{max}] \times [z_{min}-H, z_{min}]$, avec $H > 0$ un paramètre décrivant la profondeur du sous-sol qu'on souhaite considérer. L'utilisation de GMSH permet alors de générer un maillage optimisé pour les applications d'imagerie. On projette ensuite les coordonnées des points des éléments tétraédriques du maillage sur un plan 2D $P2(x, y)$.

Etape 3 : Plus proches voisins entre P2 et P1

Pour faire le lien entre le plan projeté P1 du MNT et le plan P2 associé au cube maillé, on identifie pour chaque point du plan P2 le plus proche voisin parmi les points du plan P1. A cause du grand nombre de points, il est nécessaire d'utiliser une structure de données adaptée pour identifier les plus proches voisins (2D-tree).

Etape 4 : Déformation du cube

Après la détermination des plus proches voisins des points du maillage du cube parmi les points du MNT, le maillage 3D du cube est déformé en modifiant simplement la coordonnée z_p en \bar{z}_p de chaque point grâce à la transformation suivante :

$$\bar{z}_p = \frac{z_p - (z_{min} - H)}{H} \times (z_M - z_{min}) \quad (1)$$

Où z_M est la coordonnée z du plus proche voisin dans la liste des points issue de la photogrammétrie.

2.1. Problème direct

La méthode des éléments finis tétraédriques est utilisée pour approcher le comportement d'un champ électrique dans le problème direct. Cette modélisation permet de simuler une injection de courant électrique tel que réalisé en pratique pour la méthode IRE. Il s'agit de mettre en place, en utilisant les principes de la formulation variationnelle la recherche d'une solution approchée de l'équation de Poisson dans un domaine compact avec des conditions aux limites, comme le montre la Figure 2, ce qui nous donne le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\nabla} \cdot (\sigma \vec{\nabla} V) = 0 \text{ dans } \Omega \\ \oplus \vec{\nabla} \cdot (\sigma \vec{\nabla} V) = 0 \text{ dans } \bar{\Omega} \text{ tel que } \lim_{\infty} V = 0 \\ \oplus \vec{n} \cdot \vec{j} = v \text{ sur } \mathcal{E} \\ \oplus \vec{n} \cdot \vec{j} = 0 \text{ sur } \Gamma \end{array} \right. \quad (2)$$

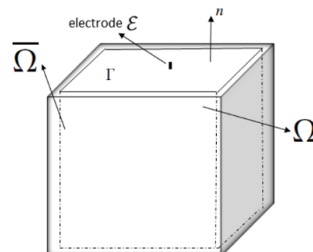


Figure 2. Domaine mathématique (non réel) de l'étude.

Avec V le potentiel électrique, σ la conductivité électrique et J la densité de courant électrique. ∇ et $\nabla \cdot$ Représentent les opérateurs linéaires gradient et divergence respectivement. Les conditions aux limites sur $\bar{\Omega}$ ont pour rôle d'éviter un effet de bord du champ électrique. Deux solutions sont traitées dans ce but : soit en éloignant en distance le bord du domaine en implémentant la condition de Dirichlet $V=0$, soit par des conditions aux limites de type infinis en étirant les bords à l'aide de fonctions d'interpolation tel que $V \rightarrow 0$ à l'infini. Une solution du système (2) est approchée par la méthode d'éléments finis de type tétraédrique linéaire et quadratique.

2.2. Problème inverse

Les scientifiques et les ingénieurs souhaitent fréquemment faire le lien entre les paramètres physiques caractérisant un modèle m , aux observations collectées constituant un ensemble de données \mathcal{D} . Nous supposons pour un problème discret linéaire une relation entre m et \mathcal{D} en fonction de la fonction \mathcal{G} , telle que:

$$\mathcal{G}(m) = \mathcal{G} m = \mathcal{D} \quad (3)$$

Une solution approximative peut être estimée en trouvant un modèle particulier m qui minimise le résidu entre les données mesurées et $\mathcal{G} m$. Le vecteur résiduel, avec des éléments qui sont souvent simplement appelés les résidus \mathcal{R} , est écrit dans l'expression suivante:

$$\mathcal{R} = \mathcal{D} - \mathcal{G} m \quad (4)$$

La méthode des moindres carrés (norme L2) est intéressante, car elle se prête très bien à l'analyse du modèle m dans un domaine géométrique complexe. Elle consiste à minimiser le résidu de $\|\mathcal{G}m - \mathcal{D}\|^2$. Le problème peut être écrit sous la forme :

$$\text{Trouver } m \text{ qui minimise: } \|\mathcal{G}m - \mathcal{D}\|^2 = (\mathcal{G}m - \mathcal{D})^\top (\mathcal{G}m - \mathcal{D})$$

La solution au sens des moindres carrés est donnée par l'expression suivante :

$$m = (\mathcal{G}^\top \mathcal{G})^{-1} \mathcal{G}^\top \mathcal{D} \quad (5)$$

3. Cas d'étude

3.1. Les Vaches Noires

De Houlgate à Villers-sur-Mer, les falaises des Vaches Noires s'étendent sur près de 5 km. Ce site naturel classé présente un risque naturel lié au falaise et au retrait de la côte. En effet, l'érosion de la falaise consécutive aux mauvaises conditions climatiques en fait un endroit dangereux de par son instabilité et ses coulées de boues en cas de fortes pluies (Letortu et al, 2015 ; Medjkane et al., 2019).

Pour illustrer les capacités du code PyMERI-3D trois profils électriques ont été réalisés perpendiculairement à la pente. La figure 3.a) présente le modèle photogrammétrique obtenu par un survol en drone de la zone. Cette figure présente également les trois profils réalisés (P1 à P3). Les falaises présentent un dénivelé de 74 m avec de fortes variations latérales. Les profils sont composés de 128 électrodes espacés de 2 m. A partir de ce nuage de points un maillage tétraédrique de la zone est réalisé (fig 3.b). Le problème

inverse est ensuite résolu permettant d'obtenir un résultat d'imagerie 3D de toute la zone. A partir de ce bloc 3D, des coupes 2D peuvent être extraites afin d'analyser la composition interne des Vaches Noires. Ces coupes peuvent également être replacées dans le modèle photogrammétrique afin d'améliorer l'interprétation de ces dernières.

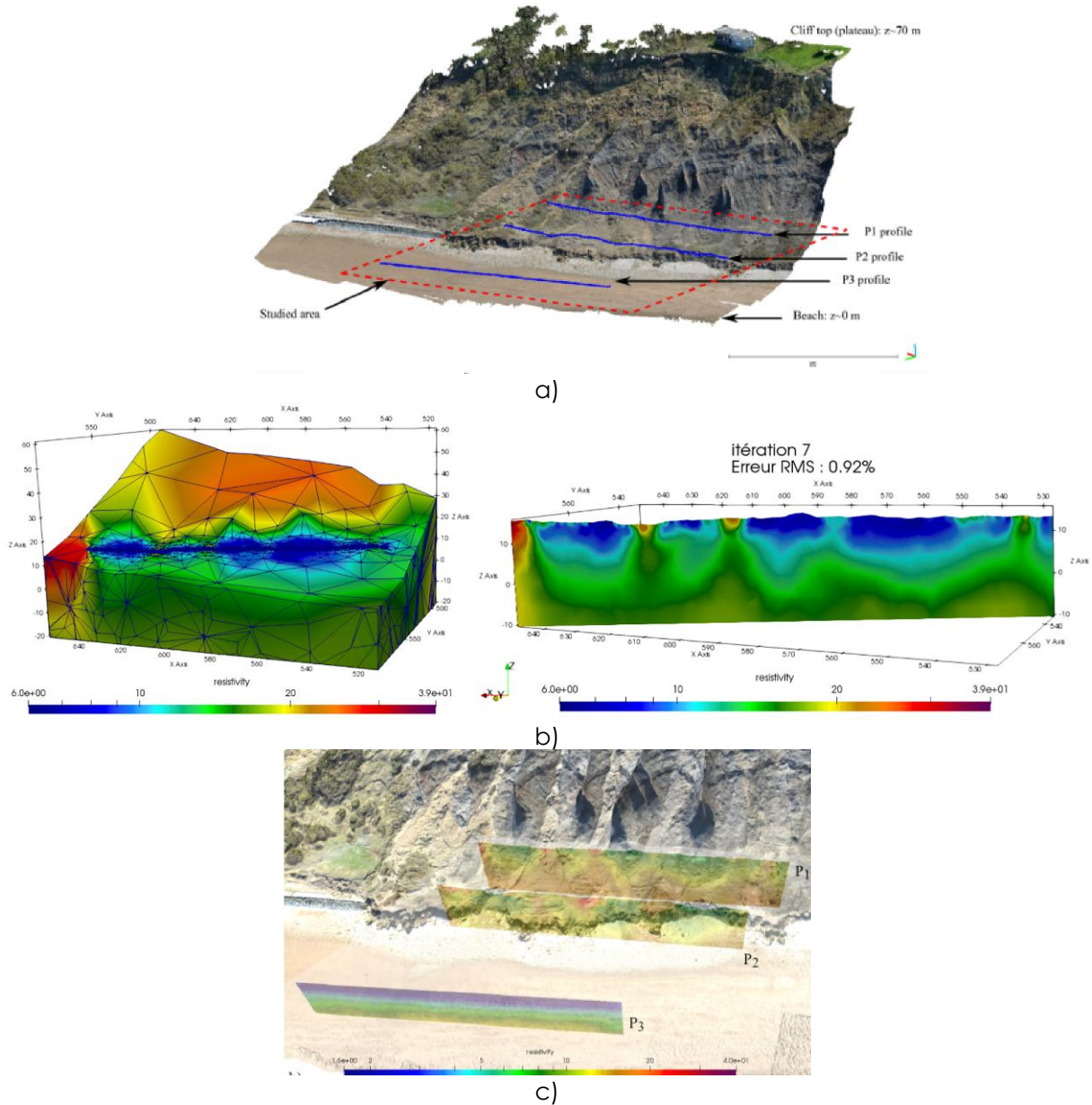


Figure 3. a) modèle photogrammétrique avec localisation des profils électriques, b) géométrie maillée et inversée à gauche et coupe extraite du bloc 3D à droite. c) profils inversés repositionnés dans le résultat photogrammétrique.

La solution donnée en 3D est plus réaliste que celles d'autres logiciels en 2D, car elle prend en compte l'ensemble de la topographie de la surface de manière très précise. L'interprétation des résultats géophysiques et photogrammétriques superposés permettent d'analyser la coïncidence entre les propriétés géologiques internes et les Vaches Noires.

3.2. Pilier de carrière souterraine

Pour illustrer les capacités du code PyMERI-3D un second exemple plus complexe est présenté. Ce cas d'étude concerne l'imagerie d'un pilier de carrière souterraine situé à Saint Martin le Nœud où la méthode ERI-3D est utile pour la compréhension des différents processus de transfert des eaux dans la zone non saturée.

Ce cas d'étude est plus complexe car une simple projection des points du MNT n'est plus possible (Fargier et al., 2017). Dans ce cas figure la projection est réalisée sur une géométrie simple mais approchant la géométrie du pilier. Concernant la partie acquisition géophysique, trois ceintures d'électrodes composées chacune de 64 électrodes sont disposées autour du pilier à trois hauteurs. Un protocole Wenner-Schlumberger est réalisé sur chaque ceinture d'électrodes. L'obtention du nuage de point est assurée par une campagne photogrammétrique réalisée autour du pilier de carrière. Les figures 4.a et 4.b présentent deux clichés tandis que la figure 4.c présente le nuage de point obtenu à partir du traitement photogrammétrique.

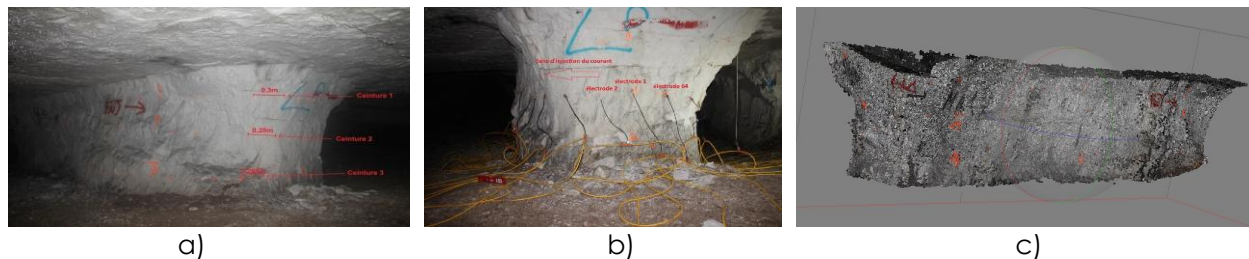


Figure 4. a) cliché du pilier issu de la campagne photogrammétrique, b) seconde ceinture d'électrode utilisée pour l'acquisition géophysique, c) modèle photogrammétrique obtenu.

Suivant la procédure décrite précédemment, un maillage est réalisé à partir du nuage de point afin de pouvoir résoudre les modélisations numériques nécessaires à la procédure d'inversion. La figure 5.A présente le modèle maillé utilisé pour l'inversion. La figure 5.B présente le résultat d'inversion 3D obtenu pour le pilier. Nous pouvons observer que la résistivité interne varie de manière importante avec des anomalies conductrices vers 15 Ohm.m et des anomalies résistantes vers 1000 Ohm.m.

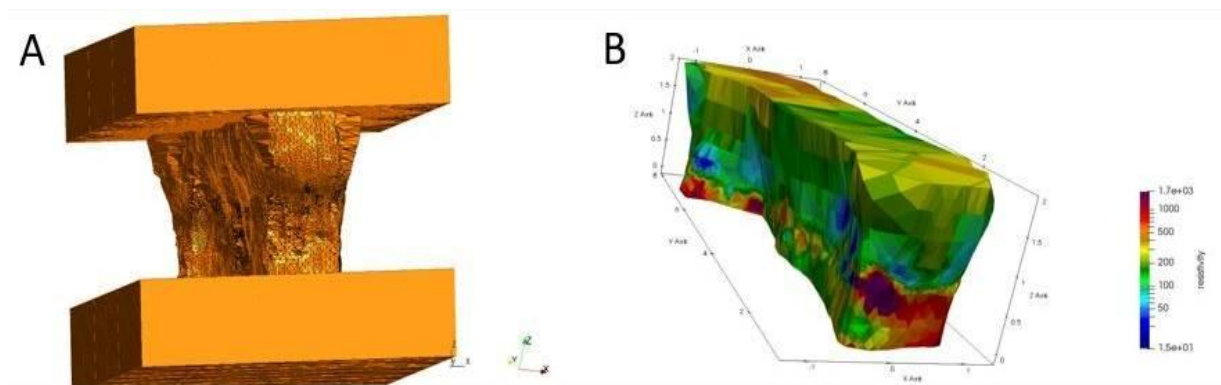


Figure 5. A) modèle maillé de la géométrie auscultée, B) résultat d'inversion

La figure 6 présente une analyse un peu plus détaillée de la composition du pilier. Tout d'abord, trois sections du bloc-3D sont présentées ensemble (en haut à gauche) puis présentées séparément afin de distinguer les anomalies réelles des artéfacts d'inversion.

A partir du bloc 3D, une seconde analyse est menée en présentant les surfaces iso-valeurs de résistivité. Cette analyse permet de discriminer les zones présentant une faible résistivité et donc potentiellement anormales pour ce type de matériau.

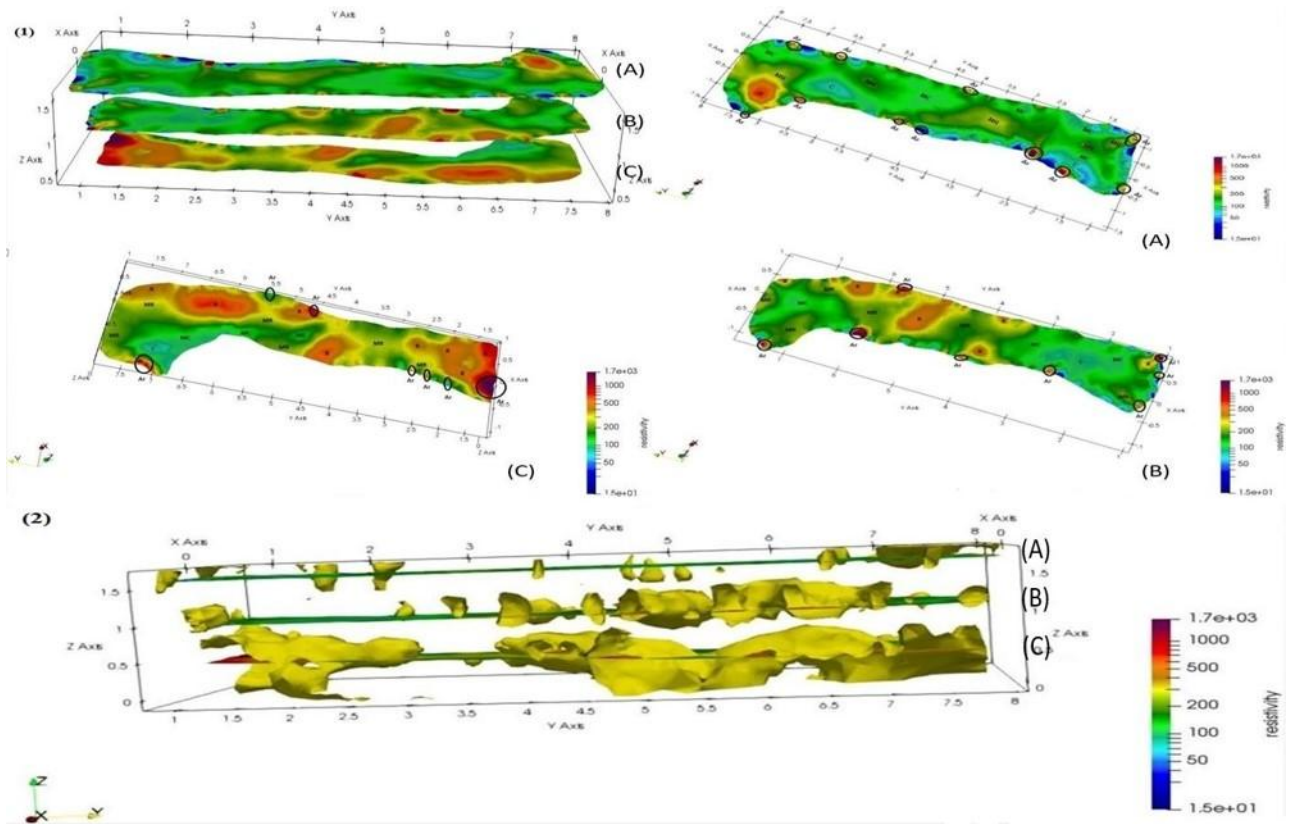


Figure 6. Analyse du résultat d'inversion avec soit des coupes extraites du bloc-3D soit des surfaces d'une iso-valeur de résistivité (en bas)

4. Conclusions

Nous avons mis au point un code Python permettant la modélisation et l'inversion 3D de mesures électriques sur des terrains à topographie complexe. Ce logiciel a été appliqué à l'interprétation des mesures réalisées sur les falaises des Vaches Noires et des piliers de carrière. L'utilisation du Code PymERI-3D permet une prise en compte 3D explicite de la géométrie de l'ouvrage étudié. Cela permet de limiter très fortement la présence d'artéfacts dans le résultat d'inversion et donc améliore la robustesse du rendu. De plus une représentation des coupes extraites dans un modèle photogrammétrique permet d'améliorer l'interprétation géologique des résultats.

Ce travail est financé par la Région Normandie, dans le cadre du projet « TéléDéTaC » et réalisé au sein du Cerema par l'équipe ENDSUM, en collaboration avec le Laboratoire de Mathématiques de l'Insa de Rouen Normandie, de l'Ifsttar et du LETG/Géophen de Caen.

5. Références bibliographiques

Fargier, Y. (2011). Développement de l'Imagerie de Résistivité Électrique pour la reconnaissance et la surveillance des Ouvrages Hydrauliques en Terre (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Nantes (ECN)).

Fargier, Y., Palma Lopes, S., Fauchard, C., François, D., Côte, P. (2014). DC-electrical resistivity imaging for embankment dike investigation: a 3D extended normalisation approach. *Journal of Applied Geophysics*, 103, 245-256.

Fargier, Y., R. Antoine, L. Dore, S. Palma Lopes, C. Fauchard (2017) 3D assessment of a quarry pillar by combination of photogrammetric and geoelectric methods. *Geophysics* (2.02), 82(4), E143-E153.

Fauchard, C., Antoine, R., Bretar, F., Lacogne, J., Fargier, Y., Maisonnave, C., Guilbert, V., Marjerie, P., Thérain, P.-F. Dupont, J.-P. (2013) Assessment of an ancient bridge combining geophysical and advanced photogrammetric methods: Application to the pont de coq, France, *Journal of Applied Geophysics*, 98, 100–112.

Fauchard, C., Saley, A. D., Fargier, Y., Antoine, R., Thérain, P.-F., Camerlynck C. (2017) Discovery of the Romanesque church of the Abbey of Our Lady of Bec (Le Bec-Hellouin, Normandy, France) by means of geophysical methods. *Journal of Archaeological Science* (1.5). 25(4), 315-328.

Geuzaine, C., & Remacle, J. F. (2009). Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre-and post-processing facilities. *International journal for numerical methods in engineering*, 79(11), 1309-1331.

Gout, C., Le Guyader, C. (2006) Segmentation of complex geophysical structures with well data, *Computational Geosciences* 10(4), pp. 361-372.

Günther, T., Rücker, C., & Spitzer, K. (2006). Three-dimensional modelling and inversion of DC resistivity data incorporating topography—II. Inversion. *Geophysical Journal International*, 166(2), 506-517.

Loke, M. H. (2002). RES2DINV ver. 3.50. Rapid 2-D resistivity and IP inversion using the least square method.

Ozeré, S., Gout, C., Le Guyader, C. (2015) Joint segmentation/registration model by shape alignment via weighted total variation minimization and nonlinear elasticity, *SIAM Journal on Imaging Sciences* 8(3), pp. 1981-2020.

Pierrot-Deseilligny, M., Clery, I. (2012, February). Some possible protocols of acquisition for optimal use of the “APER0” open source software in automatic orientation and calibration. *EuroCOW workshop* (pp. 8-10).

Portal

Taoum, S., Tonnoir, A., Fargier, Y., Antoine, R., Fauchard, C. (2020) PyMERI I: Modeling the electrical field in near surface using the infinite element boundary conditions in complex topography context, submitted.

Taoum, S., Tonnoir, A., Fargier, Y., Antoine, R., Fauchard, C. (2020) PyMERI II: Inversion scheme for the imaging of electrical resistivity of the underground, submitted.

Letortu, P., Costa, S., Maquaire, O., Delacourt, C., Augereau, E., Davidson, R., Suanez, S., Nabucet, J. (2015) Retreat rates, modalities and agents responsible for erosion along the coastal chalk cliffs of Upper Normandy: The contribution of terrestrial laser scanning. *Geomorphology*, 245, 3-14, 2015.

Medjkane, M., Maquaire, O., Costa, S., Roulland, T., Letortu, P., Fauchard, C., Antoine, R., Davidson, R. (2018) High resolution monitoring of complex coastal morphology changes: cross-efficiency of SfM and TLS-based survey (Vaches-Noires cliffs, Normandy, France). *Landslides*, 15 (6), 1097-1108.