**Pymeri : Code d’estimation de la résistivité électrique du sol**

**Sam Taoum1, Cyrille Fauchard1, Yannick Fargier2, Antoine Tonnoir3, Raphaël Antoine1**

1 : Cerema Normandie Centre, équipe ENDSUM, 10 Chemin de la Poudrière, 76120 Le Grand-Quevilly, France

2 : Univ. Lyon/IFSTTAR/GERS, F-69675, Lyon, France

3 : Normandie University, INSA Rouen Normandie, LMI, 76000 Rouen, France

**Résumé**

Les méthodes d’imagerie électrique sont utilisées en géophysique afin d’estimer la résistivité électrique qui permet de visualiser les différentes structures du sol. Elle est obtenue par la résolution d’un problème direct et inverse. La majorité des logiciels d’inversion électrique sont commerciaux et généralement appliqués pour des cas 2D. Un nouveau code libre en 3D est présenté ici. Il est basé sur l’utilisation d’un ensemble de logiciels libres et de codes Python. Il permet l’interprétation de mesures électriques sur des topographies complexes.

**Abstract**

The Electrical Resistivity Imaging method (ERI) is usually used to estimate the electrical resistivity distribution of the soil, by solving forward and inverse problem. Most of available ERI softwares are commercial and generally dedicated to 2D studies. Here, we present a new open source 3D-ERI code, based on other free softwares and Python codes. It allows the interpretation of geophysical data in a complex 3D environment.

1. **Introduction**

En géophysique de subsurface, la méthode électrique consiste à appliquer un courant (quasi) continu entre deux électrodes implantées dans le sol et à mesurer la différence de potentiel entre deux électrodes supplémentaires **[2,4]**. La majorité des méthodes électriques et les outils commerciaux d’interprétation existants sont parfaitement adaptés pour étudier les structures 2D **[5]**. Cependant, la diffusion en 3D de champs électriques dans le sol ne peut être ignorée et doit être considérée pour estimer la résistivité mesurée en environnement complexe **[2,6].**

Nous présentons ici un code Python appelé "Pymeri": "PYthon Modelling Electrical Resistivity Imagery", permettant l’imagerie de résistivité d’objet à topologie complexe, issue par exemple de nuage de points photogrammétriques ou LiDAR. Il s’agit d’un logiciel indépendant, évolutif et libre d’accès. Il est capable de traiter des problèmes de grandes dimensions et il est adapté aux limitations de mémoire vive des PC. Une interface graphique permet à l'utilisateur de saisir les paramètres nécessaires de manière conviviale.   
 Le point clé présenté ici est une stratégie de maillage d’un volume réel complexe, correspondant la topographie de l’objet étudié. Les démarches du traitement des problèmes direct et inverse sont décrites. Le résultat d’une inversion électrique sur le site des falaises des Vaches Noires (Calvados, France) est illustré.

1. **Maillage à partir d’un nuage de points**

La photogrammétrie permet de restituer la géométrie d'objets à partir de photographies. Elle permet d’obtenir un Modèle Numérique de Terrain (MNT). La génération de volumes à partir de ces MNT est complexe [2]. 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 soit coûteux, soit inadaptés.

Nous proposons une méthode basée sur des logiciels libres : le logiciel MicMac **[3]** est utilisé pour l'obtention de nuages de points, le logiciel Gmsh **[1]**, pour la génération de maillage 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 :

 **Figure 1** : Différentes étapes du maillage d’un volume 3D basé sur des nuages de points.

Etape 1 : Projection des points MNT en 2D P1(x,y)

Les données “brutes” issues du logiciel MicMac sont un ensemble de points de coordonnées (xi; yi; zi) i=1…N où N est le nombre de points. Dans le cas d’une topographie très complexe (falaises des Vaches Noires), 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 note (xmin,xmax), (ymin,ymax) et (zmin,zmax) les minima et maxima des coordonnées (xi,yi,zi) du nuage de points. On construit dans l'étape 2, un cube de dimension [xmin,xmax]×[ymin,ymax]×[zmin-H,zmin], avec H >0 un paramètre décrivant la profondeur du sous-sol qu'on souhaite considérer. L’utilisation de GMSH permet alors de mailler ce cube. On projette ensuite les coordonnées des points des éléments tétraèdriques du maillage sur un plan 2D P2(x,y), comme le montre la Figure 1.

Etape 3 : Plus proches voisins entre P2 et P1

Pour faire le lien entre le plan projeté P1 du MNT et le plan P2 du 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 (les arbres-2D).

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 cuble est déformé en modifiant simplement la coordonnée zp en p de chaque point grâce à la transformation suivante :

(1)

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

1. **Problème direct**

La méthode des éléments finis tétraédriques est utilisée pour approximer le champ électrique dans le problème direct. Il s’agit de mettre en place, en utilisant les principes de la formulation variationnelle ou faible, 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 :

(2)



**Figure 2 :** Domaine mathématique (non réel) de l’étude.

Les conditions aux limites sur ont pour rôle d’éviter la réflexion 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→0 à l’infini. Une solution du système (2) est approximée par la méthode d’éléments finis de type tétraédrique linéaire et quadratique.

1. **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 𝓓. Nous supposons, pour un problème discret linéaire, une relation entre 𝒎 et 𝓓 en fonction de la fonction 𝓖, telle que:

𝓖(𝒎) = 𝓖 𝒎 = 𝓓 (3)

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

𝓡 = 𝓓 – 𝓖 𝒎 (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 ||𝓖𝒎 - 𝓓||2. Le problème peut être écrit sous la forme :

Trouver 𝒎 qui minimise : ||𝓖𝒎 - 𝓓||2

= (𝓖𝒎 – 𝓓)T (𝓖𝒎 – 𝓓)

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

𝒎 = (𝓖T𝓖)-1 𝓖T 𝓓 (5)

1. **Validation**

De Houlgate à Villers-sur-Mer, les falaises des Vaches Noires s’étendent sur près de 5 kilomètres. Si le panorama de ce site naturel classé y est magnifique, les risques y sont également bien présents. 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.

On s’intéresse aux mesures du haut des falaises jusqu’à la plage (74 m de dénivelé, 264 m de long, 128 électrodes, 2 m d’espacement) permettant d’obtenir la carte de résistivité à partir de Pymeri, et donc la répartition des matériaux au sein des falaises et de préciser la carte géologique du site.

****

**Figure 3 :** A gauche, résistivité inversée et maillage 3D sur les falaises. A droite, coupe 2D verticale extraite sous les électrodes.

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. Elle coïncide en partie avec les données géologiques de la zone de site des Vaches Noires et l’interprétation est en cours.

1. **Conclusion**

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 est actuellement testé sur d’autres objets, notamment des piliers de carrière.

**Remerciements**

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.

**Références :**

**[1]** 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.

**[2]** 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)).

**[3]** Pierrot-Deseilligny, M.,& Clery, I.(2012, February).Some possible protocols of acquisition for optimal use of the “APERO” open source software in automatic orientation and calibration. In *Castelldefels, Spain, Tutorial, EuroCOW workshop* (pp. 8-10).

**[4]** Fargier, Y., Lopes, S. P., 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.

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

**[6]** 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.

**Mots clés :** problème direct, problème inverse, résistivité électrique, maillage, méthode des éléments finis