

PROJET OHMPI : UN RESISTIVIMETRE OPEN SOURCE A COUT MODERE POUR LES APPLICATIONS DEDIEES A L'ECHELLE DU LABORATOIRE

FARGIER Yannick¹, DUBOIS Vivien², GUYARD H el ene³, FORQUET Nicolas², GANCE Julien⁴, CLEMENT r emi²

¹ Université Gustave Eiffel, Lyon, France, yannick.fargier@univ-eiffel.fr

² INRAE – Lyon Grenoble, France, remi.clement@inrae.fr

³ IGE, Grenoble, France

⁴ IRIS Instruments, Orléans, France

RESUME

Cet article présente le développement d'un résistivimètre robuste, flexible, open-source et à cout mod er e. Dans sa version actuelle, le matériel est d edi e à la réalisation de campagnes de tomographie de résistivité électrique nécessitant une faible puissance et donc une faible profondeur d'investigation. Nous présentons la carte mesure à 4 points et le multiplexeur permettant d'automatiser la mesure sur 32 électrodes (pour moins de 500\$). Les résultats obtenus sur circuits électroniques équivalents et sur un cas d'étude réel à faible profondeur d'investigation montrent la stabilité et qualité du matériel.

Mots clés : Résistivimètre, méthode à 4-points, cout mod er e, open source, application dédiée

OHMPI: AN OPEN SOURCE RESISTIVITY METER FOR DEDICATED APPLICATIONS AT THE SMALL AND LABORATORY SCALE

ABSTRACT

The article presents the developments of a low-cost and open hardware resistivity-meter providing the scientific community with a robust and flexible tool for small experiments. The present version is a basic resistivity-meter with the current injection and measurement functions associated to a multiplexer that allows to perform automatic measurements with up to 32 electrodes (for less than 500\$). Measurements obtained on equivalent circuits and small field experiments show the stability of the OhmPi measurements correlated with a commercial reference instrument.

Key words: Resistivity meter, 4-terminal method, dedicated application, low cost, open source

INTRODUCTION

Un effort de recherche important des dernières décennies a men e au développement de r esistivim tres multi-électrodes, multicanaux, précis, robustes et polyvalents. Ces travaux ont participé à l'émergence de la technique de tomographie de résistivité électrique et permis des avancées majeures dans de nombreux domaines tel que les géosciences ou l'environnement (Clément *et al.*, 2009) ou le génie civil (Badr *et al.*, 2019). La principale limitation de ce matériel ne tient pas dans sa qualité ou sa robustesse sur le terrain. Elle concerne le coût du matériel et sa faible adaptabilité pour des problématiques scientifiques précises (Florsch and Muhlach, 2018).

Pour ces raisons la méthode est sous-exploitée pour des applications humanitaires, dans les pays en voie de développement et pour des applications à but non lucratif (archéologie, environnement). Dans le domaine de l'environnement, du génie civil ou des géosciences, le monitoring géophysique est devenu une clé pour évaluer les systèmes et les phénomènes naturels. Pour ces problématiques, l'immobilisation d'un ou plusieurs r esistivim tres n'est pas toujours possible techniquement et financ erement. Enfin, de nombreuses applications nécessitent aujourd'hui de pouvoir asservir la mesure par des informations externes et donc optimiser la mesure dans le cadre d'une politique « big

data ». Le projet Ohmpi vise à proposer un résistivimètre open source hardware et software à la communauté et au monde académique.

L'objectif de ce travail est de présenter OhmPi, un résistivimètre open source basé sur une carte de type Raspberry Pi pour des applications dédiées. Dans un premier temps nous présenterons rapidement le matériel nécessaire à la mesure en 4-points multiplexée. Dans un second temps nous présenterons les résultats obtenus sur des données en laboratoire et sur le terrain, comparés pour ces derniers à un résistivimètre référence.

MATERIEL ET METHODES

La figure 1 synthétise le principe de fonctionnement de OhmPi. Il est important de noter que le matériel présenté ici est la version 1.02 dérivé et amélioré de l'article de Clément et al. (2020) dont l'ensemble des détails se trouvent sur la plateforme de partage (<https://reversaal.gitlab.irstea.page/OhmPi>). Sur cette page la liste complète des références des composants utilisés ainsi que de nombreux conseils de montage sont proposés. La figure 1 indique en rouge les améliorations apportées sur les versions plus récentes du matériel (à partir de la version 1.5 en cours de validation). OhmPi est composé deux grands sous-ensembles. Le 1er (en bleu à gauche sur la figure) correspond à la mesure en 4 points. Elle se compose d'une mono-carte programmable (ici un micro-ordinateur Raspberry Pi 3b). Cette carte permet de piloter un convertisseur analogique numérique (ADC) digitalisant l'information de potentiel mesurée (pour le courant (A) ou la différence de potentiel mesurée (V)). Ce potentiel est lié à un courant injecté via une source de puissance (noté « POWER ») pilotée également par le Raspberry Pi. La 2nde partie du matériel concerne le multiplexage permettant de permuter les électrodes de potentiel ou de courant parmi les électrodes disponibles et ainsi réaliser une tomographie. La figure 1- à droite présente une possibilité de montage de OhmPi v1.5 (64 électrodes) au sein d'un boîtier d'acquisition facile (boîtier courant et peu cher).

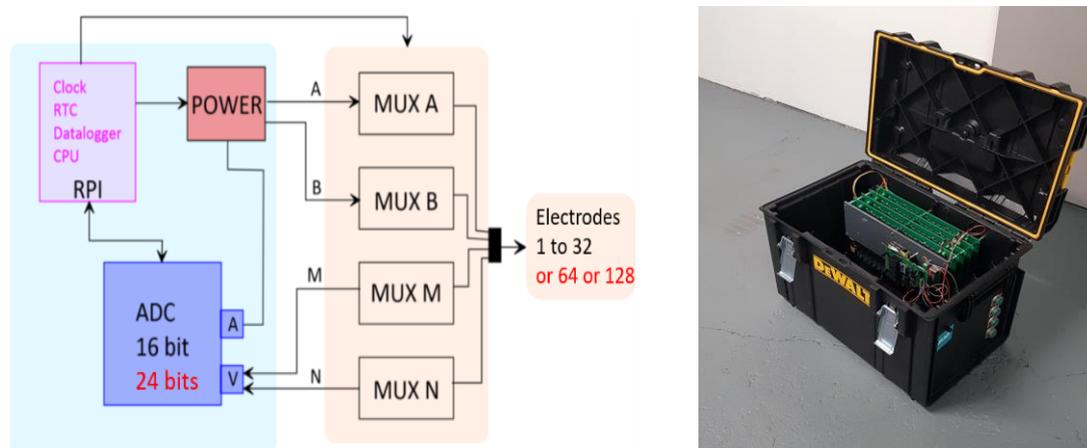


Fig. 1 – à gauche Schéma de principe de OhmPi. En noir V1.1. En rouge depuis V1.5. Modifié d'après Clément et al. (2020) – à droite Photo du montage d'OhmPi 1.5 avec un montage à bas cout.

RESULTATS ET DISCUSSION

De nombreux essais sont réalisés en laboratoire et sur le terrain afin de qualifier le matériel. Dans un premier temps des essais sur montage électronique équivalent sont présentés. Dans un second temps des essais sur un cas d'étude réel sont présentés.

Essais en laboratoire sur montage électronique équivalent

En premier lieu, des essais en laboratoire sont réalisés sur des montages électroniques équivalents représentés par la figure 3.a. Ce modèle électronique est ainsi partiellement représentatif d'une mesure dite à 4-points réalisée sur le terrain. La partie multiplexage n'est donc pas utilisée. La

résistance R_2 simule la résistance théorique des câbles, des composants électroniques internes à OhmPi, les résistances de prise et la résistance du matériau entre A et M ou entre B et N. La résistance R_1 simule la résistance du « terrain » entre les électrodes de potentiel M et N. La figure 3.b présente les résultats de mesure obtenus avec OhmPi avec le schéma précédent en faisant varier les résistances R_1 et R_2 (1% de tolérance). Pour ces tests, R_2 varie de 47 à 5600 Ohm et R_1 varie de 0.22 Ohm à 2000 Ohm. La figure 3.b présente les résultats de cette étude paramétrique. Chaque cellule de cette matrice résultat représente un couple R_1 et R_2 . A noter que chaque mesure est répétée 8 fois pour évaluer une erreur de répétabilité de la mesure (Clément *et al.*, 2020). Les résultats de la figure 3.b montrent la grande qualité des mesures avec une résistance de transfert mesurée ($R_t = DV/I$) égale à la résistance R_1 quel que soit R_2 étudié. Une étude plus poussée sur l'origine des erreurs de mesure est ensuite présentée dans Clément *et al.* (2020). Un résultat de cette étude est porté figure 3.c. avec le calcul de la variation relative ($R_t \text{ error} (\%)$) entre R_t mesuré et R_t « réel » (R_1). Ce résultat montre que la plus grande erreur est enregistrée lorsque la résistance R_2 est élevée et la résistance R_1 faible, ce qui est tout à fait conforme à nos attentes. Il peut être noté que les amplitudes des erreurs relevées sont faibles (<0.1% en moyenne) et même inférieures à la tolérance des résistances utilisées (1%).

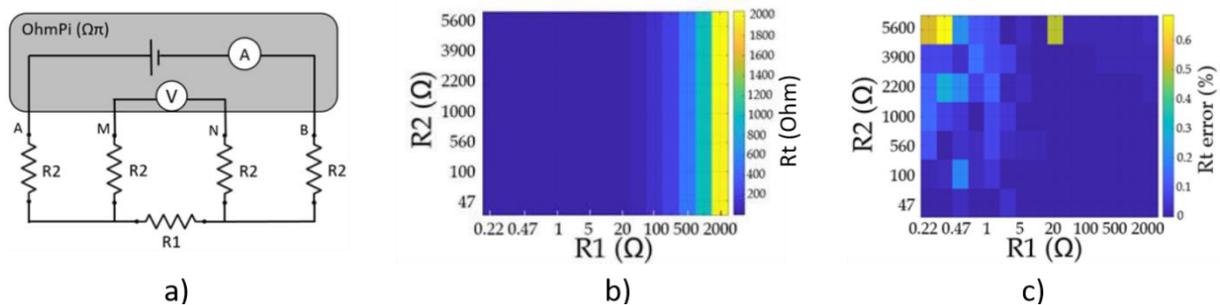


Fig. 3 –Essais en laboratoire. a) schéma du montage électronique équivalent. b) résultats de mesure de résistance de transfert. c) Erreur relative sur la résistance de transfert mesurée.

Essais sur terrain

Deux campagnes de mesure réalisées sur un même site à quelques heures d'espacement sont comparées. Ces deux campagnes utilisent le même dispositif de terrain composé de 16 électrodes espacées de 25 cm. La première campagne est réalisée avec OhmPi tandis que la seconde emploie un résistivimètre commercial pris comme référence. Un même protocole d'acquisition composé de mesures Wenner-Schlumberger et Dipole-Dipole (182 quadripoles) répété quatre fois est réalisé sur les deux appareils. Une résistance de prise entre 0.9 et 2.7 kOhm est observée sur site. Les jeux de données obtenus avec les deux appareils présentent une très bonne corrélation ($R^2=0.9996$). Ces jeux de données sont inversés avec le logiciel Res2dinv dont les résultats sont présentés figure 4. La figure 4.a présente la coupe de résistivité obtenue avec OhmPi et la figure 4.b la coupe de résistivité obtenue avec le résistivimètre de référence. La très forte corrélation des résultats de tomographie nous permet de conclure quant à la bonne qualité des mesures réalisées par OhmPi.

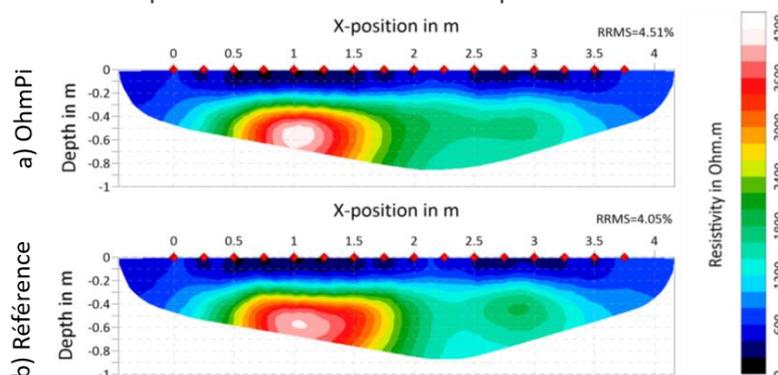


Fig. 4 –Résultats d'inversion Res2Dinv à partir des jeux de données mesurés a) par OhmPi et b) par le résistivimètre référence. D'après Clément *et al.* (2020)

LE FUTUR D'OHMPI

De nombreux développements attendent Ohmpi dans un avenir proche. Dans un premier temps une V1.5 sera proposée beaucoup plus compacte et plus facile à assembler que la série 1.OX. L'ergonomie sera donc revue dans un objectif « plug and play » même si le résistivimètre conservera des caractéristiques de mesure similaires aux versions 1.OX. Elle présentera aussi l'avantage de disposer d'un multiplexeur 32, 64 ou 128 électrodes (à assembler soi-même). Progressivement la version 1.5 sera complétée par la version 2 courant 2021. Cette version intégrera une carte de mesure avec un ADC 24bit, des composants spécifiques impliquant une mesure plus fine du courant et un convertisseur permettant d'injecter jusqu'à 50V à 2A. En parallèle au développement du hardware, nous travaillons (i) à la réalisation d'une interface graphique (ii) au développement et l'intégration d'un outils d'inversion sur la Raspberry Pi (iii) à l'écriture du code pour la mesure de PS et de PP (iv) à la télétransmission de l'information et à l'asservissement de l'acquisition par un ou plusieurs capteurs externes.

CONCLUSIONS

Nous présentons OhmPi, un résistivimètre robuste, flexible, open-source et à cout modéré. Le faible prix de ce matériel permet sa multiplication ou son immobilisation pour des applications de monitoring long. L'objectif du développement est également de tendre vers des résistivimètres à application dédiée ; c'est-à-dire optimisés et dédiés au suivi d'une problématique précise (ex : suivi infiltrations dans des colonnes, capteurs de résistivité...). OhmPi est un travail collaboratif est participatif. L'objectif, au travers de cette publication, est de pouvoir diffuser le matériel dans un objectif d'utilisation et d'évolution constante. Nous lançons ainsi un appel à la communauté scientifique souhaitant participer à son développement ou souhaitant plus simplement l'utiliser pour des applications variées (laboratoire, archéologie...).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BADR J., FARGIER Y., PALMA-LOPES S., DEBY F., BALAYSSAC J.-P., DELEPINE-LESOILLE S., COTTINEAU L.-M., G. VILLAIN G., 2020 – Design and validation of a multi-electrode embedded sensor to monitor resistivity profiles over depth in concrete. *Construction and Building Material*, 223, 310–321.

CLEMENT R., DESCLOITRES M., GUNTHER T., RIBOLZI O., LEGCHENKO A., 2009 – Influence of shallow infiltration on time-lapse ERT: Experience of advanced interpretation, *Comptes Rendus Geosci.* 341, 886–898.

CLEMENT R., FARGIER Y., DUBOIS V., GANCE J., GROS E., FORQUET N., 2020 – OhmPi: an open source data logger for dedicated applications of electrical resistivity imaging at the small and laboratory scale. *HardwareX*, 8, e00122.

FLORSCH N., MUHLACH F., 2018 – Géophysique appliquée pour tous – Volume 1, Méthodes électriques. *ISTE Editions*, 196 pages.