

Les contours d'une instrumentation durable

Rémi Clément¹
Arnold-Fred Imig¹
Stéphanie Prost-Boucle¹

CORRESPONDANCE

remi.clement@inrae.fr

RÉSUMÉ

L'instrumentation conventionnelle utilisée en sciences environnementales n'est pas toujours adaptée aux contraintes de terrain et peut se révéler coûteuse en maintenance et en réparation. L'unité de recherche REVERSAAL du centre Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes a initié un concept d'instrumentation durable qui intègre de nombreuses préoccupations de la responsabilité sociétale et environnementale (RSE) portée par INRAE : réduire les impacts des outils utilisés pour les activités de recherche et pour les installations de protection de l'environnement, promouvoir une science totalement ouverte à tous et rendre accessibles et réutilisables les outils développés ou leurs composants. En effet, la philosophie de cette instrumentation se base sur trois piliers : des codes *open source*, une conception *open hardware* et une approche *low-tech* de l'électronique. Deux projets phares illustrent le concept. Le premier, intitulé « Ohm-Pi », propose un résistivimètre pour caractériser les milieux poreux tels que les sols. Le second, nommé « SETIER », développe une instrumentation durable pour le suivi du traitement des eaux résiduaires. Ces projets dessinent les contours d'une instrumentation innovante, maîtrisée et fiable : ils fournissent les preuves de concepts d'outils de mesure *open source* et *open hardware* qui sont facilement réparables, adaptables et appropriables par l'utilisateur, autrement dit *low-tech*.

MOTS-CLÉS

Mesure ; *low-tech* ; traitement de l'eau ; géophysique ; environnement

¹ INRAE, REVERSAAL, 69100 Villeurbanne, France

Outlining the scope of sustainable instrumentation

Rémi Clément¹
Arnold-Fred Imig¹
Stéphanie Prost-Boucle¹

CORRESPONDENCE

remi.clement@inrae.fr

ABSTRACT

Conventional instrumentation used in environmental sciences is not always suited to fieldwork and can be costly to maintain and repair. The REVERSAAL research unit, which is based at the Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes INRAE center, has initiated a sustainable instrumentation concept that addresses many of the social and environmental responsibility concerns promoted by INRAE, such as reducing the environmental impact of research tools and environmental protection facilities, promoting fully open science, and making developed tools and their components accessible and reusable. This instrumentation philosophy is built on three pillars: open-source software, open-hardware design, and a low-tech approach to electronics. Two flagship projects embody this concept. The first, OhmPi, is a resistivity meter designed for characterising porous media such as soils. The second, SETIER, develops sustainable instrumentation for monitoring wastewater treatment processes.

These projects provide a framework for innovative, reliable instrumentation and demonstrate the feasibility of open-source and open-hardware measurement tools that are easy to repair, adaptable and user-friendly.

KEYWORDS

Instrumentation; measurement; low-tech; water management; geophysics; environment

¹ INRAE, REVERSAAL, 69100 Villeurbanne, France

Introduction

Les outils de mesure actuels utilisés en sciences environnementales, bien que fiables et performants, se caractérisent par des coûts élevés liés à l'achat et à la maintenance. Ils répondent difficilement aux exigences spécifiques des scientifiques : intégration de nouveaux paramètres, protocoles de communication entre capteurs, spatialisation des points de suivi et réparation rapide pour limiter la perte de données.

Depuis 2017, des ingénieurs et techniciens de l'unité REVERSAAL, du centre INRAE Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes, créent des instruments de mesure à la fois peu coûteux, réparables et dont les composants sont pour partie réutilisables, réduisant ainsi leur empreinte environnementale. Ces solutions sont flexibles et transparentes afin de permettre aux utilisateurs de comprendre, reproduire et s'approprier pleinement ces technologies. Cette approche définit les contours d'une instrumentation alternative qui se veut partagée (*open source* et *open hardware*) et davantage adaptable et durable que le matériel industriel propriétaire.

Bien que cette démarche n'ait pas été initiée exclusivement pour des préoccupations liées à la responsabilité sociale et environnementale (RSE), son objectif initial était de maîtriser l'instrumentation tout en réduisant les coûts. Aujourd'hui, elle contribue pleinement au développement des concepts inhérents à la responsabilité sociétale des instituts de recherche sur cette thématique. Par exemple, la notion de réparabilité permet à la fois des économies de ressources et une meilleure appropriation des outils par l'ensemble des opérateurs. Le matériel développé devient ainsi économiquement et technologiquement accessible, tout en ayant une portée sociétale, notamment grâce à une éducation à la science en lien avec les enjeux environnementaux.

Une stratégie d'instrumentation qui repose sur trois concepts et huit piliers essentiels

Cette stratégie d'instrumentation réunit trois concepts de plus en plus reconnus et adoptés dans de nombreuses disciplines scientifiques, et huit piliers essentiels.

Les trois concepts :

- l'*open source*, autrement dit « logiciel libre », où les éléments de programmation en particulier les codes des dispositifs sont rendus publics afin que tout un chacun puisse les modifier pour ses besoins spécifiques, les reproduire et les utiliser librement ;
- l'*open hardware*, qui repose sur le principe de matériel libre et ouvert ;
- la *low-tech*, ou « basse technologie », qui vise des solutions simples et peu consommatrices en ressources pour tendre vers une sobriété technologique ; l'objectif est la réparabilité en fournissant des documentations pour accompagner l'utilisateur dans sa démarche d'instrumentation ouverte.

Les huit piliers :

- un **dépôt de type GitLab** qui centralise les développements et la gestion collaborative des projets et développements ;
- des **licences adaptées** (Open Source Initiative®, CERN Open Hardware Licence) qui garantissent à la fois l'ouverture du code, la libre utilisation des designs matériels et les droits des développeurs ;
- un **site internet** qui fournit une documentation rigoureuse sur l'assemblage, l'utilisation et la maintenance des instruments développés ;
- des **formations (à l'assemblage, l'utilisation et la réparation)** destinées à accompagner les utilisateurs et à favoriser leur appropriation des logiciels, centrales d'acquisition et capteurs ;
- une **diffusion active des connaissances** à travers des conférences, des journées techniques, des articles scientifiques, des salons professionnels et des supports pédagogiques (tutoriels) pour encourager l'adoption de ces solutions ;

Le caractère original et innovant de cette stratégie repose sur plusieurs aspects clés qui la distinguent des approches classiques en instrumentation scientifique :

- une **approche complète et structurée de l'*open hardware*** : contrairement à de nombreuses initiatives qui se concentrent uniquement sur le développement technique, cette stratégie propose une **approche globale** intégrant la conception d'instruments, la documentation, la diffusion et l'appropriation par une communauté d'utilisateurs ;
- **transparence et compréhension des outils scientifiques** : cette stratégie permet de lever le voile sur des instruments souvent considérés comme des « boîtes noires » ; cette transparence favorise un regard critique sur les mesures et permet aux étudiants, techniciens, ingénieurs et chercheurs de mieux maîtriser et interpréter les données collectées ;
- un **modèle reproductible et évolutif** : en fournissant des plans, des guides d'assemblage et un accès libre aux sources des instruments développés, la répliquabilité et l'adaptation des outils par d'autres équipes sont encouragées. Cela permet une diffusion rapide des innovations et une évolution constante en fonction des retours des utilisateurs.

Il convient de souligner que ce projet répond à des enjeux de RSE, lesquels s'inscrivent dans une dynamique internationale. À ce titre, il constitue un levier important pour le développement de collaborations à l'échelle mondiale, offrant ainsi à l'unité de recherche REVERSAAL une visibilité et des opportunités de partenariat non négligeables.

OhmPi : un résistivimètre pour caractériser les milieux poreux

L'objectif d'OhmPi (*Open source and open hardware resistivity-meter*) est de proposer un résistivimètre dit *open hardware*, à la fois flexible et réparable (Figure 1), entièrement à la disposition de la communauté scientifique (Clement *et al.*, 2020). Le projet est coordonné par l'unité REVERSAAL d'INRAE, en collaboration avec

plusieurs partenaires académiques et scientifiques : l'université de Mons et l'université de Liège (Belgique), le Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST), l'université Gustave Eiffel, le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) et l'Institut de recherche pour le développement (IRD).

La tomographie de résistivité électrique (TRE) est une technique très utilisée dans le milieu environnemental pour caractériser les milieux poreux. En fournissant la distribution de la résistivité électrique, cette technique permet d'obtenir des informations inédites en 2D et 3D (Figure 2).

Ce projet répond aux besoins croissants des utilisateurs de caractérisation par tomographie de résistivité électrique, dans des

domaines variés tels que l'infiltration, la surveillance des digues, les pilotes de laboratoire ou encore les filtres plantés de roseaux. À titre de comparaison, un résistivimètre classique coûtera environ 25 à 45 k€ tandis que celui développé avec OhmPi coûtera entre 4 et 7 k€, en fonction du nombre d'électrodes. Les fonctionnalités ne sont pas exactement les mêmes, OhmPi étant destiné aux expérimentations en suivi temporel en laboratoire ou à de petites expérimentations de terrain. Il est moins puissant que les équipements commerciaux, mais il offre une plus grande flexibilité et une intégration simple dans des réseaux de capteurs grâce à la Raspberry Pi embarquée et au protocole MQTT, ainsi qu'une rétrocompatibilité.

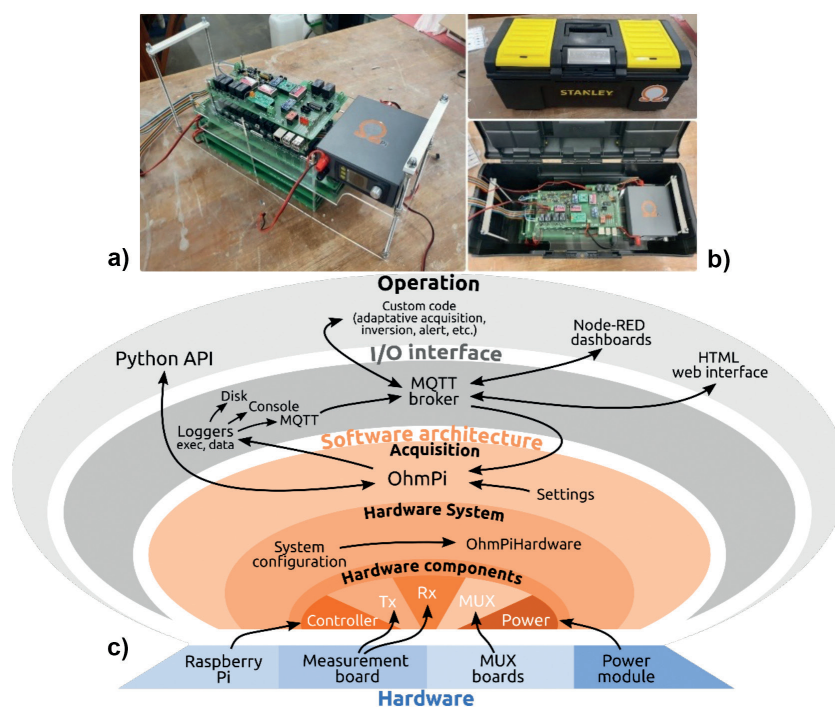


Figure 1. Résistivimètre Ohmpi V2024, 16 électrodes 50V-4A (en haut), architecture logicielle (en bas) (d'après OhmPi.org)

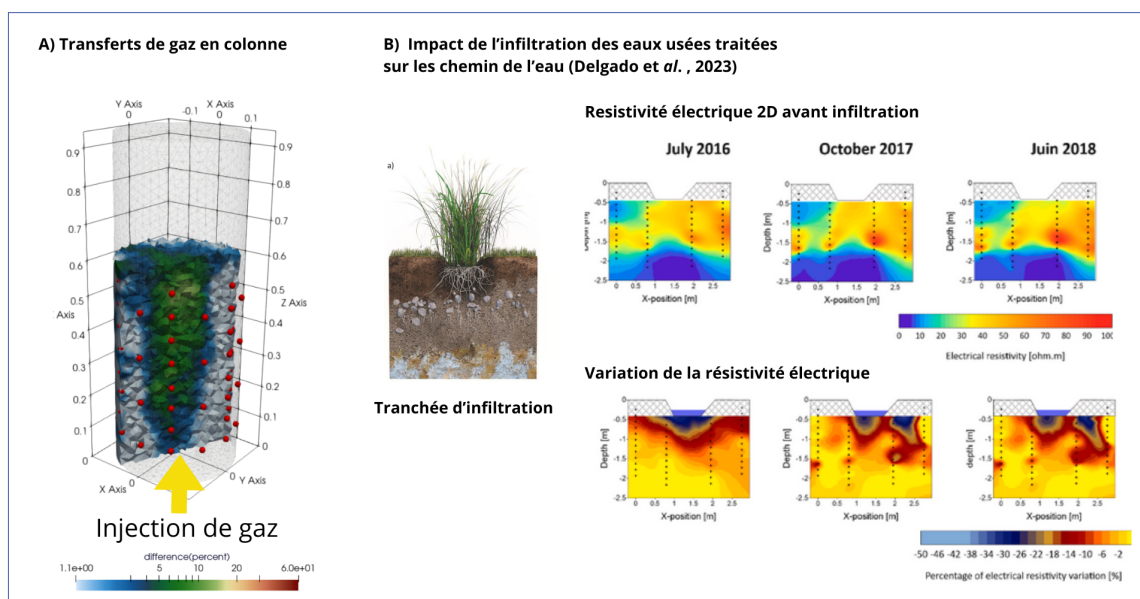


Figure 2. Exemples d'applications de la tomographie de résistivité électrique

L'intégralité des développements d'OhmPi est regroupée dans un dépôt accessible à tous¹. Outre les plans et les codes, la description des différentes cartes et l'assemblage de l'équipement complet sont centralisés sur une page². Le site inclut également des « dépannages » qui aident l'utilisateur à maintenir son équipement.

Principales avancées techniques du projet :

- L'architecture logicielle d'OhmPi se distingue par une approche modulaire, offrant une flexibilité remarquable pour répondre aux besoins spécifiques des utilisateurs. Il est à noter que toutes les cartes électroniques sont rétrocompatibles, ce qui garantit que chaque module peut être utilisé avec les versions précédentes ;
- L'intégration d'un Raspberry Pi dans le système OhmPi simplifie considérablement la connectivité IoT (*internet of things*). Autrement dit, OhmPi est un résistivimètre connecté qui peut s'intégrer dans un réseau de capteurs pour publier de l'information ou, à l'inverse, OhmPi peut recevoir des informations d'autres capteurs (celles d'un pluviomètre par exemple) pour déclencher ces mesures ;
- OhmPi est conçu pour être facilement réparable grâce à sa structure modulaire et à une documentation détaillée pour les utilisateurs. Les guides fournis simplifient l'entretien et permettent facilement la mise à jour du système.

SETIER : instrumentation pour le traitement des eaux résiduaires

L'objectif du projet SETIER³ est de développer des centrales de mesures *low-tech* pour le suivi des installations de traitement des eaux usées. Ce projet est coordonné par l'unité REVERSAAL d'INRAE, en partenariat avec l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, l'IRD et l'unité PROSE (Procédés biotechnologiques au service de l'environnement) d'INRAE. Dans ce cadre, trois types de centrales différentes ont été développés et permettent la mesure et l'enregistrement des données :

- consommation énergétique (par pinces ampérométriques) ;
- débit (avec capteur ultrason de hauteur d'eau) ;
- physico-chimie (pour les paramètres pH, conductivité, redox, oxygène dissous et température).

Le choix des centrales a été effectué à l'issue d'une enquête nationale menée auprès des services de l'État, des collectivités et des bureaux d'études. La centrale d'acquisition se distingue par son originalité car elle ne requiert aucune soudure : sa conception repose sur des connecteurs type « Lego ». L'ensemble des composants (Figure 3), tous accessibles sur le marché français, peut être adapté par l'utilisateur.

Les 3 principales avancées techniques du projet :

- Des centrales d'acquisition ouvertes, modulables et *open hardware*, capables de collecter des données de capteurs variés ont été conçues. Elles sont équipées d'un module Wi-Fi permettant la gestion à distance, l'étalonnage en ligne et la télétransmission des mesures. Réparables et évolutives, ces centrales réduisent les coûts et limitent l'obsolescence des équipements industriels classiques (Guyard *et al.*, 2025).
- Le projet a identifié et testé des capteurs à coût abordable pour surveiller les paramètres clés en eaux usées. Ces capteurs ont été validés en conditions réelles sur banc d'essai et en stations d'épuration, garantissant leur précision et leur fiabilité pour une utilisation en recherche et en exploitation sur sites réels.
- Tous les développements matériels et logiciels de SETIER sont publiés en *open source* sur GitLab⁴, accompagnés de guides détaillés et de tutoriels permettant à toute structure (laboratoires, bureaux d'études, collectivités) d'assembler et d'utiliser ces instruments. Cette démarche favorise l'innovation collaborative et l'accessibilité des outils scientifiques.

À titre d'exemple, un débitmètre classique de type bulle-à-bulle coûte entre 2 000 et 4 000 €, tandis que celui développé par SETIER est proche de 600 €, pour des fonctionnalités et une précision similaires.

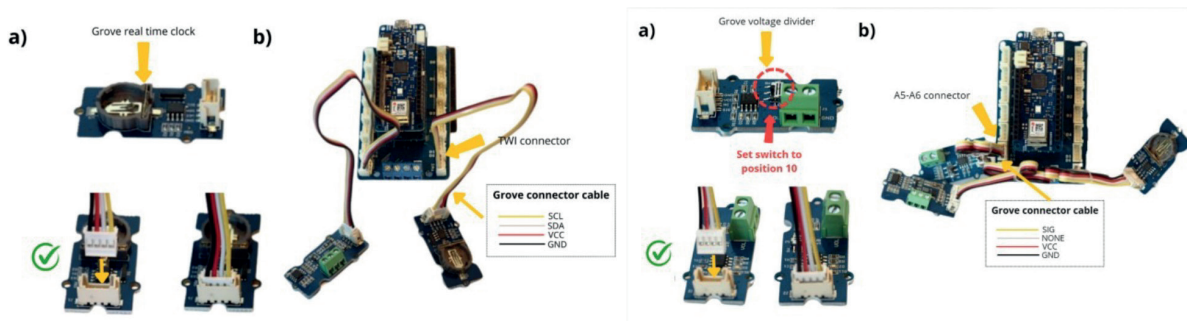


Figure 3. Assemblage d'une centrale SETIER de type « Lego » sans soudure

1. <https://gitlab.com/ohmpi/ohmpi>

2. <https://ohmpi.org>

3. <https://www.setier.fr/>

4. <https://forgemia.inra.fr/open-hardware/setier-datalogger>

Conclusions et perspectives

Les scientifiques de l'unité de recherche REVERSAAL ont développé des instruments de mesure environnementale durables, principalement à travers les projets OhmPi et SETIER. Bien que l'instrumentation ouverte soit encore peu connue dans le domaine de la recherche, elle offre de nouvelles perspectives en matière de partage, d'innovation et d'instrumentation plus flexible pour les chercheurs.

Le projet OhmPi s'est déjà imposé comme un outil de référence reconnu par la communauté scientifique géophysique mondiale. Un premier *workshop* international OhmPi, dont les places étaient limitées à 16 personnes, a été organisé en avril 2025 par REVERSAAL. Les participants ont eu l'opportunité de fabriquer leur propre résistivimètre. Initialement, 128 candidats se sont manifestés pour participer, ce qui révèle l'importance grandissante pour les scientifiques et techniciens du domaine de s'approprier le savoir-faire lié à la construction de leurs outils de mesure.

Les projets OhmPi et SETIER bouleversent les pratiques au-delà du monde académique. Les industriels adoptent ces solutions *open source* pour compléter leurs équipements commerciaux dans le suivi environnemental, notamment pour la surveillance des sols pollués et la gestion des eaux. Des domaines d'application inattendus tels que des associations de sauvegarde du patrimoine expriment également leur intérêt pour ces outils.

Le succès de ces projets a déclenché une dynamique d'innovation en géophysique et en instrumentation environnementale, dans une logique d'indépendance et de sobriété technologique. REVERSAAL ambitionne de développer, en collaboration avec un fabricant d'instrumentation scientifique, une plateforme *open source*, *open hardware* et *low-tech* pour favoriser l'essor d'une instrumentation résiliente dans les années à venir.

REVERSAAL affiche donc une cohérence entre ses recherches menées pour l'environnement, en particulier le traitement et l'infiltration des eaux usées, et des pratiques de travail vertueuses d'un point de vue de la responsabilité sociétale. Les outils développés sont réparables, modulables et réutilisables pour réduire les coûts et l'obsolescence, et leur développement garantit une science ouverte à tous. ■

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Adeline Dubost (responsable du service communication du Centre INRAE Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes) pour ses conseils et son accompagnement dans l'élaboration de cet article, ainsi que les relecteurs et éditeurs de notre article qui ont contribué à son amélioration.

Références

Clement, Rémi *et al.* (2020). OhmPi: An open source data logger for dedicated applications of electrical resistivity imaging at the small and laboratory scale. *HardwareX*, Volume 8, e00122. [https://www.hardware-x.com/article/S2468-0672\(20\)30031-6/fulltext](https://www.hardware-x.com/article/S2468-0672(20)30031-6/fulltext)

Delgado-Gonzalez L. *et al.* (2023). Flow path monitoring by discontinuous time-lapse ERT: An application to survey relationships between secondary effluent infiltration and roots distribution. *Journal of Environmental Management*, Volume 326, Part B. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479722024124>

Guyard, H. *et al.* (2025). An open source ultrasonic flowmeter for monitoring the input/output flow rates of wastewater treatment plants. *HardwareX*, Volume 21, e00613. [https://www.hardware-x.com/article/S2468-0672\(24\)00107-X/fulltext](https://www.hardware-x.com/article/S2468-0672(24)00107-X/fulltext)



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-SA). <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « NOV'AE », la date de sa publication et son URL.