



HAL
open science

Détection de panache de lixiviats par tomographie de résistivité 3D avec agencement d'électrodes non-régulier

Benjamin François, Jean-Christophe Gourry, Jacques Deparis

► **To cite this version:**

Benjamin François, Jean-Christophe Gourry, Jacques Deparis. Détection de panache de lixiviats par tomographie de résistivité 3D avec agencement d'électrodes non-régulier. Journées Scientifiques AGAP Qualité 2024, Université de Poitiers; CPGF-Horizon, Mar 2024, Poitiers, France. pp.03001, 10.1051/e3sconf/202450403001 . hal-04536868

HAL Id: hal-04536868

<https://brgm.hal.science/hal-04536868>

Submitted on 8 Apr 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Detecting landfill leaks through non-regular electrodes array 3D electrical resistivity tomography

Détection de panache de lixiviats par tomographie de résistivité 3D avec agencement d'électrodes non-régulier

*Benjamin François*¹, *Jean-Christophe Gourry*¹, and *Jacques Deparis*¹

¹BRGM, Direction Risques et Prévention, 45060 Orléans, France

Abstract. In this survey, we aim at using 3D electrical resistivity tomography to detect possible leaks from a landfill site. We used 3 « double-U » non-regular electrodes grids to overcome on-site access limitations. The use of an optimization tool for selecting relevant quadrupoles, combined with an inversion mesh that takes into account the geometry of PEHD membranes, proved useful in refining the final results obtained from field data inversion.

Résumé. Cette étude vise à détecter de possibles fuites de lixiviat sur une décharge au moyen d'une tomographie de résistivité électrique 3D. Afin de contourner les limitations d'accès du site, nous utilisons 3 agencements d'électrodes non-réguliers en « double-U ». L'utilisation d'un algorithme d'optimisation pour la sélection des quadripôles et d'un maillage d'inversion tenant compte de la géométrie des membranes PEHD ont permis d'améliorer les résultats issus de l'inversion des données.

1 Introduction

Le stockage des déchets ménagers peut-être confronté à des problématiques de fuites des lixiviats produits par dégradation des déchets, pouvant créer une contamination de l'environnement par ces liquides. Le lixiviat est le liquide résiduel qui provient de la percolation de l'eau à travers des déchets, dont une fraction peut être soluble. Le lixiviat des décharges contient un large éventail de polluants, tels que l'ammoniac, les métaux lourds, la matière organique, les produits chimiques de soins personnels et pharmaceutiques, les pesticides, les substances perfluorés et polyfluorées, les solides dissous totaux (TDS), et bien d'autres. Ces fluides se caractérisent par une forte conductivité électrique.

La tomographie de résistivité électrique (TRE) s'avère donc être un outil pertinent pour localiser la présence de lixiviat dans le sol, et en tracer la source. En effet, la présence de ce fluide aura pour conséquence de diminuer la résistivité globale du milieu, en remplaçant l'eau naturellement présente mais plus résistive.

L'utilisation de la TRE en 2 dimensions (TRE2D) peut se heurter à certaines limites lorsque le contexte présente une forte variabilité latérale, donnant lieu à des effets latéraux qui dégrade la précision de l'imagerie faite à l'aplomb d'un profil [1]. Ces effets sont

particulièrement attendus dans le cadre de ce type d'imagerie. Dans ces conditions, il est préférable de réaliser une TRE en 3 dimensions (TRE3D) qui est plus à même de tenir compte des variations de résistivité dans un contexte fortement tridimensionnel.

Sur le site d'étude, des écoulements de lixiviats ont été observés à l'aval de la décharge. Les premières investigations géophysiques visant à localiser et caractériser ces écoulements entre le stockage des déchets et la zone de résurgence ont consisté en la réalisation de plusieurs TRE2D. Celles-ci ont mis en évidence des anomalies conductrices interprétées comme des écoulements chargés en profondeur. 2 sondages ont été réalisés sur la base de ces résultats, pour confirmer la nature de ces anomalies, mais n'ont pas recoupé d'écoulements substantiels. Des investigations 3D sont alors proposées pour mieux caractériser ces pollutions. Il s'agit également de pouvoir imager les variations de résistivité au-dessous des alvéoles contenant les déchets, pour en contrôler l'intégrité.

Le site est implanté sur des formations calcaires L'installation (Figure 1) est constituée de 2 casiers anciens, sans barrière ouvragée, dits « anciennes décharges Nord et Sud », et de 3 casiers modernes avec barrières ouvragées (alvéoles B1, B2 et B3). Ces casiers modernes sont équipés d'une membrane PEHD imperméable et électriquement isolante. En outre, il n'est pas possible de réaliser des mesures électriques directement sur ces 3 casiers, en raison du risque de présence de biogaz pour les 2 casiers déjà fermés (B1 et B2) et de l'activité sur le casier encore en cours de remplissage (B3).

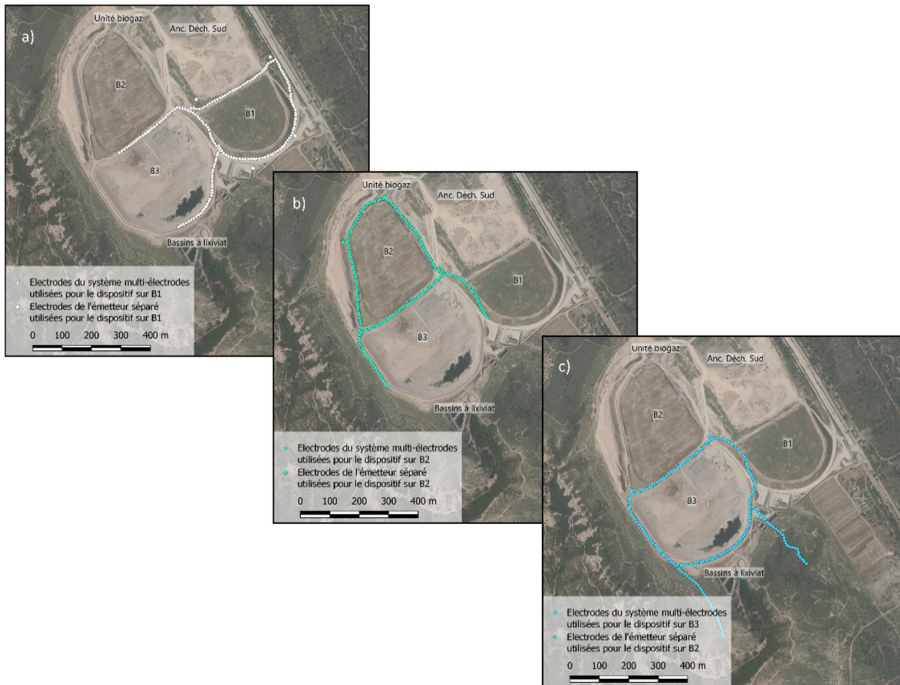


Figure 1. Agencements "en double U" des électrodes utilisés successivement sur les casiers a) B1, b) B2 et c) B3.

La mise en œuvre de TRE3D repose généralement sur une disposition régulière d'électrodes réparties sur une grille au-dessus de la zone à investiguer [2], ce qui n'est pas possible dans ce cas de figure. Les travaux présentés ici visent donc à développer et mettre

en œuvre une méthodologie d'imagerie de résistivité 3D capable de prendre en compte ces contraintes d'accès.

2 Dispositif de mesure

Le dispositif de mesure proposé pour imager les casiers et la partie aval de ceux-ci est composé par 192 électrodes agencées selon un « double-U ». Cet agencement permet d'optimiser l'utilisation d'un Syscal Switch Terra couplé à une extension Switch Terra. Trois dispositifs de ce type ont ainsi été installés sur chacun des 3 casiers, B1, B2 et B3 (Figure 1).

Sur chacun de ces dispositifs, 6 configurations de quadripôles ont été mesurés : Wenner-Schlumberger réciproque, équatorial, « L-shaped », « corner » [2], « partial overlay » [3], Schlumberger corner. Les 6 configurations sont décrites sur la Figure 2.

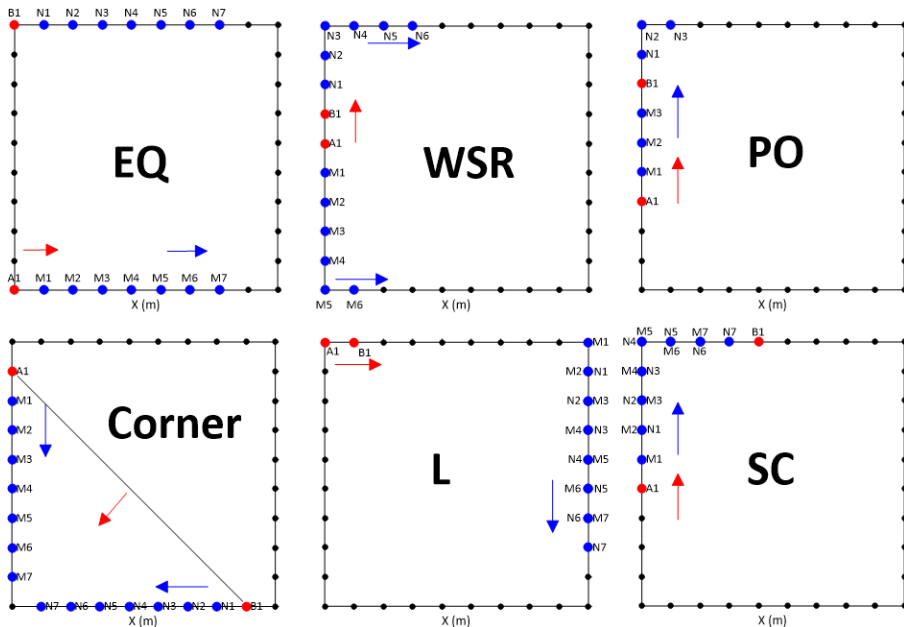


Figure 2. Description des protocoles de mesure équatorial (EQ), Wenner-Schlumberger réciproque (WSR), partial overlay (PO), corner, L-shaped (L) et Schlumberger corner (SC).

Un programme de génération de séquence a été écrit dans le logiciel Matlab®. La géométrie simplifiée des électrodes est entrée dans le script qui prend en compte leurs positions effectives et qui génère les séquences de mesure pour chacune des 6 configurations géométriques de quadripôle proposées. Ce programme réalise en plus une optimisation de ces séquences pour utiliser au mieux les 20 voies du système de mesure, et ne conserve que les quadripôles dont le facteur géométrique est inférieur à un seuil, fixé à 105 m ici.

Compte tenu du grand nombre d'électrodes et des différents protocoles de mesure proposés, le nombre de mesures sur chaque casier est compris entre 500000 et 600000 environ. Un algorithme basé sur l'approche du « compare resolution » ou compare-R [4], et optimisé par B. Ovono Ekoré [5] a été développé pour sélectionner les quadripôles ayant la meilleure sensibilité par rapport à l'objet à imager. L'algorithme restitue une séquence de quadripôles de sensibilité optimale en évaluant l'évolution de la matrice de résolution au fur et à mesure qu'il complète cette séquence. En conséquence, la procédure d'inversion 3D se

trouve grandement allégée en réduisant le nombre de mesures et en ne conservant que les plus pertinentes pour résoudre le problème inverse.

3 Traitement

Bien que l'objectif de cette approche optimisée par le compare-R soit notamment d'identifier à l'avance les quadripôles les plus pertinents afin de réduire les temps d'acquisition, nous avons choisi ici de réaliser l'intégralité des mesures, et de ne réaliser le filtrage par compare-R que dans un deuxième temps. Il nous est ainsi possible de tester différents paramétrages du compare-R, et différents assemblages des jeux de données, et d'évaluer l'impact sur le résultat final. L'algorithme du code permettant le filtrage par Compare-R (écrit en Python, et utilisant Pygimli [6] pour la partie modélisation) est présenté en Figure 3.

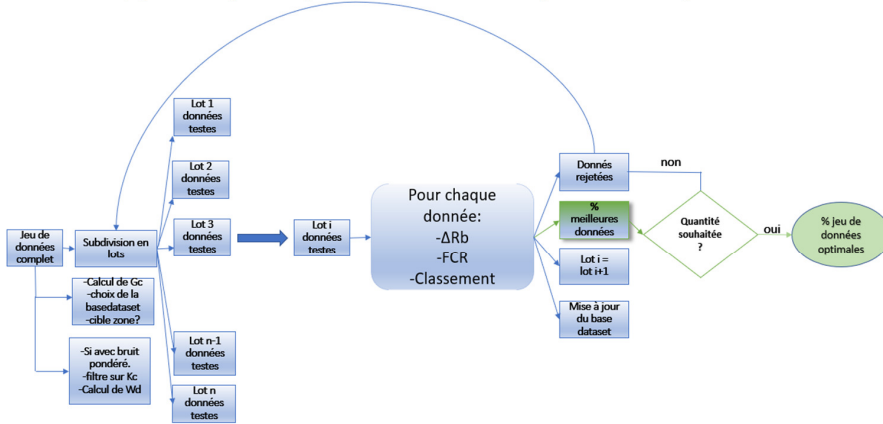


Figure 3. Algorithme du programme d'optimisation des séquences par Compare-R modifié.

Pour chaque protocole de mesure mis en œuvre, les jeux de données ont été filtrés au moyen du Compare-R pour ne conserver que les 10% les plus pertinents de chacun. Les données extraites ont ensuite été concaténées pour obtenir un jeu de données pour chaque casier. En effet l'inversion des données sur les 3 casiers simultanément n'est pas possible sur les moyens de calcul à disposition, un ordinateur équipé de 2 processeurs Intel Xeon 18 cœurs / 36 threads (Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2695 v4 @ 2.10GHz), et 256 Go de RAM.

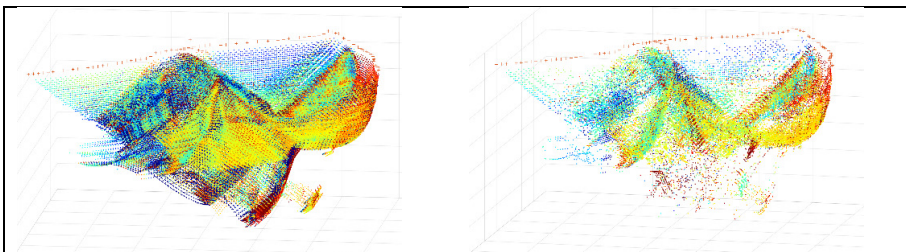


Figure 4. Exemples de mesures brutes (résistivité apparente) avant (gauche) et après application du Compare-R (droite) sur le casier B2.

Les 3 jeux de données sont ensuite inversés avec le logiciel Pygimli, sur une maille d'inversion commune. Celle-ci est préparée en amont des inversions, et tient compte de la topographie relativement marquée du site, des positions de toutes les électrodes utilisées lors des différentes acquisitions, mais aussi de la géométrie des membranes des casiers (Figure 5). Bien qu'aucun a priori sur la résistivité ne soit imposé au moment de l'inversion, cet ajout permet de raffiner le maillage au niveau de la base des casiers, et surtout de permettre à l'algorithme d'inversion de proposer de fort contraste de résistivité de part et d'autre de la membrane, si cela permet de mieux expliquer les données.

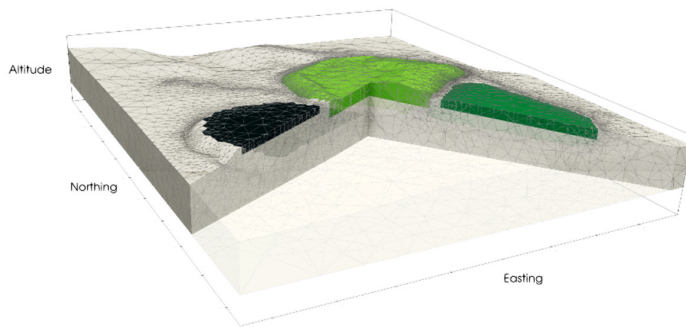


Figure 5. Maille d'inversion commune pour les 3 jeux de données. Le maillage initial est construit avec le logiciel Bert, puis modifié pour y incorporer la géométrie des membranes des casiers.

4 Résultats

Pour chacun des jeux de données, le résultat de l'inversion dans l'emprise des électrodes concernées est extrait, et les résultats sont concaténés. Le bloc de résistivité 3D (Figure 6) fait ainsi ressortir plusieurs anomalies conductrices au-dessous et à proximité des 3 casiers.

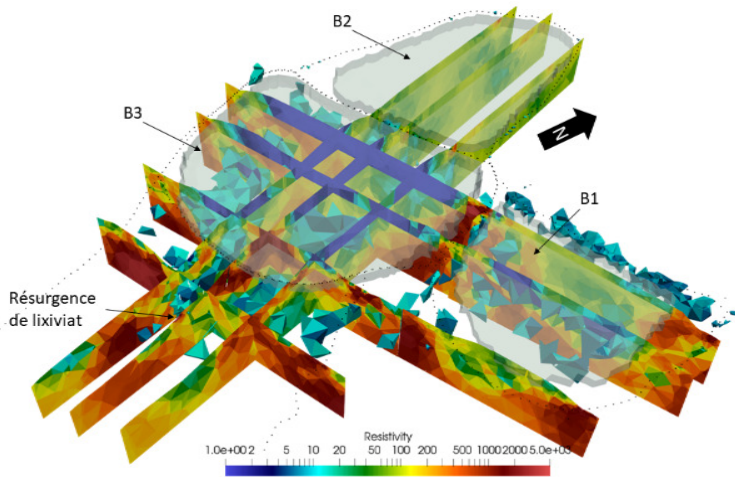


Figure 6. Représentation 3D des résultats d'inversion sur les 3 casiers. Plusieurs coupes sont extraites du bloc de résistivité, ainsi que le volume de cellules présentant une résistivité inférieure à 15 ohm.m et située en dehors des casiers.

On observe notamment, à l'aplomb du casier B3 encore en activité, 2 axes conducteurs qui convergent vers les résurgences connues de lixiviats. Les résultats mettent également en évidence d'autres anomalies sur la base desquelles des forages de contrôle ont pu être proposés.

Un autre résultat remarquable est la mise en évidence d'un milieu très conducteur, de l'ordre de 1 ohm.m, au sein du casier B3. Ces très faibles résistivités sont cohérentes avec la présence de lixiviats et le fait qu'il soit encore en cours de remplissage, et donc toujours soumis à l'infiltration des eaux de pluie, contrairement aux casiers B1 et B2 qui sont déjà fermés. Cependant ce résultat suppose que les courants électriques soient capables de s'y propager malgré la présence de membrane isolante. Dans la mesure où ce casier n'est pas encore fermé, ni recouvert d'une membrane identique à celle située au fond et le long des parois, il est possible que le courant électrique puisse circuler par la couche de sol située au-dessus de la membrane dans les talus, et se propager dans le massif de déchet.

En outre, on ne retrouve pas aussi clairement cette très faible résistivité au sein de B3 lorsque l'inversion est réalisée sur un maillage qui n'intègre pas la contrainte géométrique de la membrane (Figure 7). En effet dans ce cas de figure, les contrastes de résistivité ne sont pas aussi importants. L'ajout de ces géométries dans le maillage a donc bien pour effet d'apporter la liberté d'un fort gradient de résistivité de part et d'autre de la membrane, sans pour autant imposer un tel contraste.

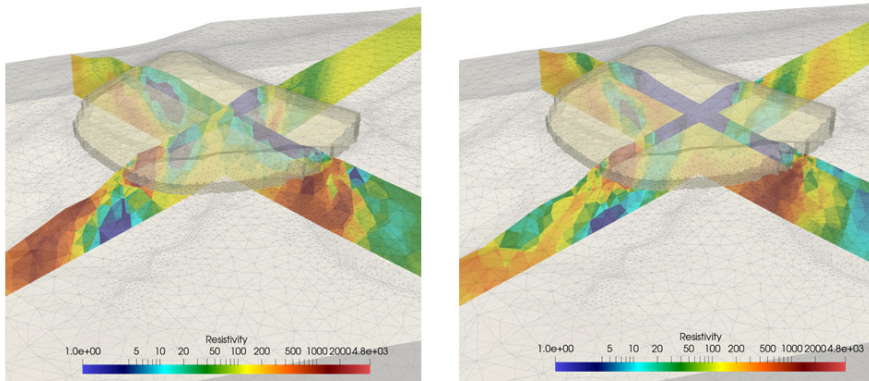


Figure 7. Comparaison des résultats d'inversion autour du casier B3, sur le maillage initial (gauche), et sur le maillage complété de la géométrie des alvéoles (droite).

5 Conclusions et perspectives

Ces travaux ont permis de développer une méthode d'imagerie de résistivité électrique 3D rendant possible une caractérisation qualitative de la distribution de résistivité à l'aplomb de structures non accessibles, et ainsi de localiser des anomalies conductrices potentiellement en lien avec des écoulements chargés.

L'outil de sélection des quadripôles par la méthode du « compare resolution » et l'inclusion de contraintes géométriques dans le maillage d'inversion ont montré leur efficacité à améliorer les résultats d'une telle imagerie.

Les résultats montrent par ailleurs que si la localisation « XY » des anomalies est globalement bien contrainte, la détermination de la profondeur des anomalies semble plus incertaine et devrait être étudiée plus en détail, notamment en s'appuyant sur les résultats de forages de contrôle à venir.

Le jeu de données issu de cette étude est conséquent, et devrait permettre des travaux complémentaires sur l'optimisation des séquences de mesure et des paramètres d'inversion, la résolution géométrique de tels réseaux de mesure, ou encore la profondeur d'investigation.

Références

- [1] H. Yin-Chun, L. Chih-Ping, L. Chin-Tan, W. Ko-Wei, 3D and Boundary Effects on 2D Electrical Resistivity Tomography, *Applied Sciences*. (2019). <https://doi.org/10.3390/app9152963>.
- [2] A. Tejero-Andrade, G. Cifuentes, R. E. Chávez, A. E. López-González, C. Delgado-Solórzano, L- and CORNER-arrays for 3D electric resistivity tomography: an alternative for geophysical surveys in urban zones, *Near Surface Geophysics*. (2015). <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2015015>.
- [3] A. Furman, T.P.A. Ferré, A.W. Warrick, A Sensitivity Analysis of Electrical Resistivity Tomography Array Types Using Analytical Element Modeling, *Vadose Zone Journal*. (2003) 416–423.
- [4] S. Uhlemann, P.B. Wilkinson, H. Maurer, F.M. Wagner, T.C. Johnson, J.E. Chambers, Optimized survey design for electrical resistivity tomography: combined optimization of measurement configuration and electrode placement, *Geophysical Journal International*. (2018) 108–121.
- [5] B. Ovono Ekore, Rapport de stage pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'École et Observatoire des Sciences de la Terre de l'Université de Strasbourg: Modélisation géophysique ERT 3D, (2022).
- [6] C. Rücker, T. Günther, F.M. Wagner, pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics, *Computers and Geosciences*. (2017) 106–123.