



**HAL**  
open science

## **Modélisation pétrophysique des processus de biodégradation**

Urie Zohore, Damien Jougnot, Roger Guérin, Pauline Kessouri, Jacques Deparis,  
Marc Crampon

### ► **To cite this version:**

Urie Zohore, Damien Jougnot, Roger Guérin, Pauline Kessouri, Jacques Deparis, et al.. Modélisation pétrophysique des processus de biodégradation. 13ème colloque GEOFCAN - Géophysique des sols et des formations superficielles, Nov 2023, Strasbourg (FR), France. <hal-04208572>

**HAL Id: hal-04208572**

**<https://brgm.hal.science/hal-04208572v1>**

Submitted on 15 Sep 2023

**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.



HAL Authorization

## MODELISATION PETROPHYSIQUE DES PROCESSUS DE BIODEGRADATION

ZOHORÉ U.L.<sup>1,2</sup>, JOUGNOT D.<sup>1</sup>, GUÉRIN R.<sup>1</sup>, KESSOURI P.<sup>2</sup>, DEPARIS J.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sorbonne Université, CNRS, EPHE, UMR 7619 METIS, 75005 Paris, France, [zohore.urie@gmail.com](mailto:zohore.urie@gmail.com)

<sup>2</sup> BRGM, Service Géologique National, 45060 Orléans, France, [zohore.urie@gmail.com](mailto:zohore.urie@gmail.com)

### RESUME

*Quelques articles scientifiques portent sur le développement de modèle permettant de décrire en courant alternatif la conductivité électrique des milieux poreux, d'une suspension colloïdale de bactéries et d'une suspension de bactéries en milieu poreux. Ces références permettent de poser les bases d'une étude des relations pétrophysiques reliant conductivité complexe (ou sa réciproque la résistivité complexe) et processus de biodégradation de polluants organiques.*

**Mots clés :** Modélisation, polarisation provoquée, biodégradation, polluants organiques

### ABSTRACT

*A number of scientific articles have been published on the development of models describing the electrical conductivity of porous media, bacterial colloidal suspension and bacterial suspension in porous media in alternating current. These references lay the groundwork for a study of the petrophysical relationships between complex conductivity (or inversely complex resistivity) and biodegradation of organic pollutants.*

**Key words:** Modeling, induced polarization, biodegradation, organic pollutants

### INTRODUCTION

Les sols pollués sont le plus souvent la conséquence d'activités anthropiques plus ou moins récentes, et constituent des problèmes sociétaux majeurs. Une étude récente (Froger et al., 2021) estime que 30% de la superficie de la France présente des concentrations en HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) des sols supérieures à 100 µg.kg<sup>-1</sup>. Les polluants une fois dans le sol représentent un risque pour les eaux souterraines et les captages d'alimentation en eau potable.

La polarisation provoquée (PP) est une extension de la méthode de la résistivité électrique en courant continu utilisée afin de mesurer la conductivité électrique complexe. Cette conductivité permet d'obtenir les propriétés de conduction et de chargeabilité du milieu. La PP peut être mesurée suivant deux manières (Ghorbani, 2007) : temporelle et fréquentielle (ou spectrale). La polarisation provoquée spectrale (PPS) mesure les paramètres électriques basse fréquence sur un spectre allant typiquement de 1 mHz à 10 kHz. Quoique de nombreux travaux aient souligné la sensibilité de la PPS à la croissance bactérienne, à la biodégradation, aux activités bactériennes telles que la production de minéraux et de biofilms (Abdel Aal et al., 2010, 2004 ; Atekwana et Slater, 2009 ; Davis et al., 2006 ; Kessouri et al., 2019 ; Ntarlagiannis et al., 2005 ; Persona et al., 2008 ; Slater et al., 2007 ; Zhang et al., 2014), toutes ces études se sont bornées à observer ces phénomènes sans les quantifier. A ce jour, très peu de travaux ont été menés pour étudier quantitativement les réponses PP des bactéries en milieu poreux. Dans le cadre du projet ANR IMAGE qui vise à étudier la réponse PP de la biodégradation sur plusieurs échelles de mesure allant de l'échelle du pore à l'échelle de la parcelle, cette étude quantitative va être menée. Avant de mener cette étude, nous présentons ici une revue d'articles portant sur le développement de modèle permettant de décrire en courant alternatif la conductivité électrique des milieux poreux, d'une suspension colloïdale de bactéries et d'une suspension de bactéries en milieu poreux.

### MODELES PETROPHYSIQUES

#### Conductivité électrique en courant alternatif

Si la conductivité en courant continu fournit des informations utiles concernant le milieu poreux, la conductivité en courant alternatif est encore plus intéressante. En effet, différents mécanismes de nature physique ou chimique interviennent en fonction de la fréquence du signal émetteur, et peuvent donc être dissociés.

Debye (1929) a proposé un modèle qui a servi de point de départ utile pour l'étude des processus de polarisation de fluides dipolaires. Dans les fluides dipolaires, comme l'eau, la polarisation d'un milieu est essentiellement due à l'orientation des molécules à moment dipolaire permanent par rapport au champ électrique imposé. En étudiant les résultats expérimentaux de la polarisation de composés liquides tels que les glycols et la glycérine, Cole et Cole (1941) ont observé que ces résultats étaient difficilement représentés par un demi-cercle (résultats attendus selon la théorie de Debye, 1929) dans un diagramme d'Argand (partie imaginaire en fonction de la partie réelle des paramètres électromagnétiques complexes). Les auteurs ont donc proposé une meilleure approximation des données expérimentales qui tient compte de la largeur des temps de relaxation associés aux différents éléments polarisables dans le milieu. Après une étude des propriétés diélectriques de la glycérine, Davidson et Cole (1951) ont découvert que les propriétés diélectriques de la glycérine n'étaient pas circulaire (résultats attendus selon la théorie de Cole et Cole, 1941) mais asymétrique. Ils incluent un coefficient  $\alpha$  qui permet d'introduire un comportement dissymétrique, observé lors des mesures. Le modèle de Cole-Cole généralisé est un modèle à 5 paramètres :

$$\rho^*(\omega) = \rho_0 \left[ 1 - m \left( 1 - \frac{1}{((1 + (i\omega\tau_0)^c)^\alpha)} \right) \right],$$

avec  $\rho_0$ , la résistivité électrique en courant continu,  $m$ , la chargeabilité intrinsèque du modèle Cole-Cole,  $\tau_0$ , le temps de relaxation du système,  $c$ , l'exposant du modèle Cole-Cole et  $\alpha$  une constante liée à la largeur de la distribution. Cette expression permet de retrouver plusieurs modèles empiriques en posant certains paramètres égaux à 1.

### Conductivité électrique d'une suspension colloïdale de bactéries

Un nombre important d'études en chimie colloïdale ont mesuré puis modélisé plusieurs mécanismes de polarisation associés aux suspensions de bactéries à l'aide de la spectroscopie diélectrique (méthode analogue à la PPS). Dans le cas d'une suspension cellulaire, les différents mécanismes de polarisation sont considérablement influencés par les propriétés des organismes. Cette sensibilité a permis à la spectroscopie diélectrique de contribuer à la compréhension des structures cellulaires.

La polarisation de type Gamma se produit entre le GHz et le THz et résulte des contributions de la relaxation de l'eau liée autour de la surface de la cellule et de la différence de permittivité entre l'intérieur de la cellule et l'électrolyte (Grosse, 2002). La polarisation de type Delta se déroule dans les gammes hautes du MHz et dépend essentiellement de la conductivité intracellulaire et de la relaxation de l'eau liée aux macromolécules intracellulaires (Irimajiri et al., 1987). Ainsi, la polarisation de type Delta est dépendante de la taille de la cellule (Grosse, 2002 ; Irimajiri et al., 1987). La polarisation de type Bêta prend place aux basses gammes du MHz et est principalement liée à la structure diélectrique de la membrane cellulaire, ainsi dépendante de l'épaisseur de la membrane (Irimajiri et al., 1987 ; Prodan and Prodan, 1999). La polarisation de type Alpha se produit en dessous du kHz et résulte de la mise en place de la double couche électrique, soit l'accumulation de charges autour de la membrane cellulaire, qui ne se développe qu'à cette plage de fréquences (Atekwana et Slater, 2009 ; Dukhin et al., 1974 ; Grosse, 2002 ; Prodan et Prodan, 1999, van der Wal et al., 1997).

Revil et al. (2012) ont proposé un modèle pour décrire la polarisation basse fréquence d'une suspension bactérienne. Ils établissent une analogie entre la polarisation des particules d'argile, qui semble être liée à la formation de la double couche électrique plus particulièrement à la présence de la couche de Stern et celle des bactéries. De ce fait, la conductivité d'une suspension bactérienne est contrôlée par la quantité de bactéries dans le milieu et leurs conductivités de surface. Contrairement à l'approche de Revil et

al. (2012), Zhang et al. (2014) ont proposé un modèle linéaire décrivant la relation entre conductivité imaginaire et abondance bactérienne au lieu de modéliser la courbe de polarisation. Toutefois, il faut noter que ce modèle ne parvient à prédire que qualitativement la conductivité imaginaire en raison probablement d'une approche linéaire simplificatrice.

### Conductivité électrique d'une suspension de bactéries dans un milieu poreux

Heenan et al. (2013) ont utilisé la méthode de la décomposition de Debye afin de suivre l'évolution temporelle de la chargeabilité. Dans leur cas d'étude, les auteurs ont mis en évidence le fait que les variations de chargeabilité étaient étroitement liées à celles de la conductivité imaginaire et donc à l'évolution bactérienne. Par ailleurs, Mellage et al. (2018) ont souligné le lien existant entre le temps de relaxation (obtenu après avoir fait correspondre un modèle Cole-Cole aux mesures de PPS) et les activités bactériennes. Ainsi, les auteurs indiquent que le temps de relaxation pourrait être lié aux conditions énergétiques du milieu ; conditions auxquelles sont soumis la croissance et l'activité bactérienne. Quoique Heenan et al. (2013) et Mellage et al. (2018) n'aient pas développé de modèle particulier pour l'interprétation quantitative des signaux électriques dans le cadre de processus biogéochimiques, ces auteurs ont utilisé des modèles préexistants (ex : type Cole-Cole) pour des applications à la modélisation de la réponse PPS de milieux contenant des bactéries. Suivant une tout autre approche, Zhang et Furman (2023) ont utilisé des méthodes statistiques pour établir des relations entre les processus biogéochimiques et les signaux géoélectriques. Revil et al. (2012), se basant sur l'approche décrite au paragraphe précédent, ont modélisé la réponse PPS de bactéries en milieu poreux. De plus, supposant une relation de proportionnalité entre la conductivité imaginaire macroscopique et la densité bactérienne, les auteurs ont proposé des formulations modélisant les phases de croissance et décroissance bactérienne. Finalement, Zhang et al. (2014) ont identifié une relation linéaire entre la conductivité imaginaire totale du milieu, la densité bactérienne et la conductivité imaginaire des minéraux constituant le milieu poreux.

### CONCLUSIONS

Cette revue a présenté un ensemble de modèles décrivant la conductivité électrique complexe associée à différents milieux. Elle permet d'établir les bases de travaux futurs consacrés à l'étude des relations pétrophysiques reliant conductivité complexe et processus de biodégradation. Revil et al. (2012) et Zhang et al. (2014) se sont limités à établir une relation entre le signal PPS et la densité bactérienne. Suivant une approche en laboratoire et numérique, nous envisageons non seulement d'évaluer les modèles pétrophysiques existants mais aussi de les étendre afin de prendre en compte dans la formulation finale la teneur en polluants organiques.

### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdel Aal G.Z., Atekwana E.A., Rosbach S., Werkema D.D., 2010** – Sensitivity of geoelectrical measurements to the presence of bacteria in porous media. *Geophysical Research Letters*. 115(G3).
- Abdel Aal G.Z., Atekwana E. A., Slater, L.D., Atekwana E. A., 2004** – Effect of different phases of diesel biodegradation on low frequency electrical properties of unconsolidated sediments. *Geophysical Research Letters*, 386–395.
- Atekwana E.A., Slater L.D., 2009** – Biogeophysics: A new frontier in Earth science research. *Reviews of Geophysics*, 47, RG4004.
- Cole K.S., Cole R.H., 1941** – Dispersion and absorption in dielectrics I. Alternating current characteristics. *The Journal of Chemical Physics*, 9, 341–351.
- Cosenza P., Ghorbani A., Camerlynck C., Rejiba F., Guérin R., Tabbagh A., 2009** – Effective medium theories for modelling the relationships between electromagnetic properties and hydrological variables in geomaterials: a review. *Near Surface Geophysics* 7, 563–578.

- Davidson D.W., Cole R.H., 1951** – Dielectric relaxation in glycerol, propylene glycol, and n-propanol. *The Journal of Chemical Physics*, 19, 1484–1490.
- Davis C.A., Atekwana E., Atekwana, E., Slater, L.D., Rossbach S., Mormile M.R., 2006** – Microbial growth and biofilm formation in geologic media is detected with complex conductivity measurements: microbial growth and geophysics. *Geophysical Research Letters*, 33, L18403.
- Debye P.J.W., 1929** – Polar molecules. *Dover publications*.
- Dukhin S.S., Shilov V.N., Bikerman J.J., 1974** – Dielectric phenomena and double layer in disperse systems and polyelectrolytes. *Journal of the Electrochemical Society* 121, 154C.
- Froger C., Saby N., Jolivet C.C., Boulonne L., Caria G., Freulon X., de Fouquet C., Roussel H., Marot F., Bispo A., 2021** – Spatial variations, origins, and risk assessments of polycyclic aromatic hydrocarbons in French soils. *Soil*, 7, 161–178.
- Ghorbani A., 2007** – Contribution au développement de la résistivité complexe et à ses applications en environnement. Mémoire de thèse de doctorat. *Université Pierre-et-Marie-Curie-Paris 6*.
- Grosse C., 2002** – Relaxation mechanisms of homogeneous particles and cells suspended in aqueous electrolyte solutions. *Interfacial electrokinetics and electrophoresis*, 106, 279–327.
- Heenan J., Porter A., Ntarlagiannis D., Young L.Y., Werkema D.D., Slater, L.D., 2013** – Sensitivity of the spectral induced polarization method to microbial enhanced oil recovery (MEOR) processes. *Geophysics*, 78, E261–E269.
- Irimajiri A., Asami K., Ichinowatari T., Kinoshita Y., 1987** – Passive electrical properties of the membrane and cytoplasm of cultured rat basophil leukemia cells. I. Dielectric behavior of cell suspensions in 0.01–500 MHz and its simulation with a single-shell mod. *Biochimica et Biophysica Acta Biomembranes*, 896, 203–213.
- Kessouri P., Furman A., Huisman J.A., Martin T., Mellage A., Ntarlagiannis D., Bückner M., Ehosioke S., Fernandez P., Flores-Orozco A., 2019** – Induced polarization applied to biogeophysics: recent advances and future prospects. *Near Surface Geophysics*, 17, 595–621.
- Mellage A., Smeaton C.M., Furman A., Atekwana E.A., Rezanezhad F., Van Cappellen, P., 2018** – Linking spectral induced polarization (SIP) and subsurface microbial processes: Results from sand column incubation experiments. *Environmental science & technology*, 52, 2081–2090.
- Ntarlagiannis D., Williams K.H., Slater L., Hubbard S., 2005** – Low-frequency electrical response to microbial induced sulfide precipitation. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 110, G02009.
- Personna Y.R., Ntarlagiannis D., Slater L., Yee N., O'Brien M., Hubbard S., 2008** – Spectral induced polarization and electrodic potential monitoring of microbially mediated iron sulfide transformations. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113, G02020.
- Prodan C., Prodan E., 1999** – The dielectric behaviour of living cell suspensions. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 32, 335.
- Revil A., Atekwana E., Zhang C., Jardani A., Smith S., 2012** – A new model for the spectral induced polarization signature of bacterial growth in porous media. *Water Resources Research*, 48 (9), W09545.
- Slater L., Ntarlagiannis D., Personna Y.R., Hubbard S., 2007** – Pore-scale spectral induced polarization signatures associated with FeS biomineral transformations. *Geophysical Research Letters*, 34, L21404.
- van der Wal A., Norde W., Zehnder A.J., Lyklema J., 1997** – Determination of the total charge in the cell walls of Gram-positive bacteria. *Colloids and surfaces B: Biointerfaces*, 9, 81–100.
- Zhang C., Revil A., Fujita Y., Munakata-Marr J., Redden, G., 2014** – Quadrature conductivity: A quantitative indicator of bacterial abundance in porous media. *Geophysics*, 79, D363–D375.
- Zhang Z., Furman A., 2023** – Statistical analysis for biogeochemical processes in a sandy column with dynamic hydrologic regimes using spectral induced polarization (SIP) and self-potential (SP). *Geophysical Journal International*, 233, 564–585.