

# Conception de nouvelles méthodes d'imagerie géophysique électromagnétique pour l'identification et la prédiction des circulations de fluides dans les réservoirs géothermiques profonds fracturés

M. Darnet (1), V. Maurer (2), J.F. Girard (3), G. Marquis (3), A. Genter (2),  
F. Bretaudeau (3), P. Wawrzyniak (3) et A. Stopin (1)

[m.darnet@brgm.fr](mailto:m.darnet@brgm.fr) 1

[vincent.maurer@es.fr](mailto:vincent.maurer@es.fr) 2

[jf.girard@unistra.fr](mailto:jf.girard@unistra.fr) 3

**Mots clés : exploration, électromagnétisme, géothermie profonde, MT , CSEM**

## 1. INTRODUCTION

La connaissance et la prédiction des circulations profondes de fluides géothermiques est un paramètre clé participant à la compétitivité de la filière géothermique. Aujourd'hui, leurs caractéristiques sont le plus souvent déduites des observations géoscientifiques post-forages mais tout l'enjeu est de pouvoir prédire à moindre coût la ressource géothermique en amont des phases coûteuses de forages profonds. Afin de répondre à cet enjeu, des méthodes géophysiques non-destructives d'exploration (sismique, gravimétrie) sont généralement mises en œuvre. L'inconvénient majeur de ces techniques est leur faible sensibilité à la présence de fluides géothermaux et donc leur incapacité à prédire avec précision la ressource en amont des forages.

Afin de pallier à ce déficit, des méthodes électromagnétiques à source naturelle (Magnéto-Tellurique ou MT) ou contrôlée (Controlled-Source Electromagnetic ou CSEM) sont généralement employées car elles permettent d'imager la conductivité électrique du sous-sol, paramètre sensible à la présence de fluides, et notamment de saumures, dans les roches. Ces méthodes ont déjà fait leurs preuves en milieu volcanique pour caractériser la géométrie des réservoirs géothermiques mais leur capacité à imager des réservoirs à fort potentiel géothermique en métropole, tels que les roches fracturées profondes dans des formations de fond de bassin, reste à prouver. De plus, dans ces bassins généralement fortement urbanisés, elles souffrent de la présence d'un fort bruit électromagnétique qui réduit grandement l'intérêt de leur mise en œuvre. Le but de ce projet de recherche était donc de concevoir des nouvelles méthodes électromagnétiques performantes dans ces milieux. Dans ce but, trois principaux verrous restaient à lever :

- (i) Démontrer par l'expérimentation en laboratoire et à l'échelle du puits que la conductivité électrique des roches permet de caractériser la présence et la géométrie des circulations profondes de fluides géothermaux dans des roches fracturées à l'échelle du réservoir.
- (ii) Concevoir des méthodes électromagnétiques Magnéto-Tellurique (MT) et à Source Contrôlée (CSEM) capables de mettre en évidence à l'échelle du réservoir géothermique les anomalies de conductivité électrique liées aux circulations profondes de fluides géothermaux.
- (iii) Développer les méthodes électromagnétiques MT et CSEM capables de mesurer la conductivité électrique des roches potentiellement réservoirs à grande profondeur (plusieurs kilomètres) sous une épaisse couverture sédimentaire et dans des contextes généralement fortement urbanisés et donc fortement bruités. Se pose également le problème de la résolution spatiale des méthodes électromagnétiques, travaillant généralement en mode diffusif à ces profondeurs, qui nécessite de prendre en compte la diffusion se produisant dans les couches sédimentaires sus-jacentes afin d'extraire la conductivité des zones profondes ciblées.

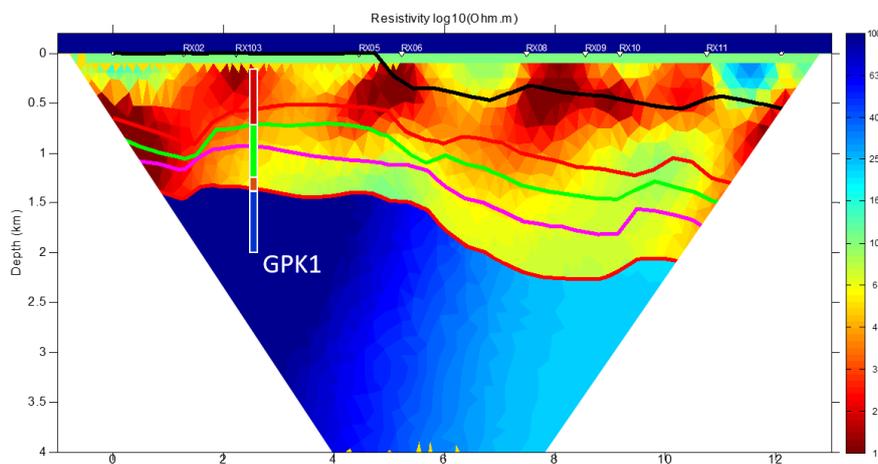
## 2. CONTENU PRINCIPAL

A partir des mesures sur échantillons en laboratoire et des diagraphies électriques en puits des sites géothermiques d'ES-G (Vidal et al., 2019), un lien fort entre conductivité électrique et degré d'altération/porosité des roches granitiques a été établi à l'échelle du laboratoire (centimètres) et du puits géothermique (centaines de mètre). Cependant, le lien avec les circulations profondes de fluides géothermaux dans ces roches fracturées n'est pas direct puisque certaines zones poreuses et altérées présentent une perméabilité importante alors que d'autres peuvent être scellées et imperméables. La mesure de conductivité électrique est donc un paramètre nécessaire à mesurer pour évaluer la présence de circulation de fluides géothermiques profonds mais pas toujours suffisant.

Le travail de modélisation électromagnétique prédictive a montré que les dispositifs CSEM les plus pertinents pour imager des circulations profondes de fluides géothermiques nécessitent l'utilisation d'un dipôle électrique horizontal comme émetteur et des capteurs électromagnétiques verticaux ou horizontaux comme récepteurs. Cependant, comme les anomalies CSEM liées aux circulations profondes de fluides géothermiques sont faibles sur les capteurs verticaux et que ceux-ci sont difficiles à mettre en œuvre avec précision, nous recommandons d'utiliser des capteurs horizontaux. Les modélisations prédictives ont également montré que les anomalies CSEM dans un bassin sédimentaire sont, au premier ordre, générées par des variations de géométrie et résistivité de la pile

sédimentaire et au second ordre liées aux circulations profondes de fluides géothermiques. Il est donc important d'imager avec précision les variations de conductivité de la pile sédimentaire afin de pouvoir ensuite cartographier les anomalies liées aux circulations de fluides géothermiques.

L'analyse de champs électromagnétiques mesurés dans la plaine d'Alsace a montré que le bruit ambiant est dans certaines zones plus puissant que les signaux CSEM recherchés. Il est donc indispensable de mettre en œuvre des émetteurs de plus forte intensité que ceux habituellement déployés pour des campagnes CSEM afin de s'affranchir de tout problème lié au niveau de bruit. La solution de l'augmentation de la longueur et de l'amélioration du couplage de l'émetteur CSEM a été testée avec succès dans ce projet et a ainsi permis d'obtenir des mesures CSEM fiables à plus de 10km de l'émetteur, ce qui n'avait encore jamais été réalisé à notre connaissance en exploration géothermique. A l'aide de tels dispositifs, des campagnes CSEM ont été réalisées à proximité des sites géothermiques profonds fracturés d'ES à Soultz-Sous-Forêts et Rittershoffen et ont permis d'obtenir des images de la conductivité électrique jusque 3/4 km de profondeur en très bon accord avec les logs de conductivité électrique enregistrés dans les puits géothermiques (illustration 1).



**Illustration 1 : Coupe de résistivité électrique obtenue après inversion des données CSEM représentée avec une échelle logarithmique. Pour comparaison, les données de diaggraphie de résistivité électrique dans le puits géothermique GPK1 sont également représentées par une barre verticale colorée. Le toit du socle granitique observé sur les données sismiques est représenté par un horizon rouge.**

## 2. CONCLUSIONS

Ces résultats confirment que la méthode électromagnétique CSEM telle que proposée est capable de mesurer la conductivité électrique des roches potentiellement réservoirs à grande profondeur (plusieurs kilomètres) sous une épaisse couverture sédimentaire et dans des contextes généralement fortement urbanisés et donc fortement bruités. Toutefois, l'influence des couches sédimentaires sus-jacentes et l'ambiguïté entre conductivité et milieux fracturés perméables rendent l'interprétation des variations observées encore incertaines en termes de présence et géométrie du réseau fracturé ainsi que de perméabilité et présence de circulations profondes de fluides géothermiques. Afin de réduire significativement cette incertitude, nous recommandons vivement d'intégrer davantage de données dans le processus d'inversion des données CSEM, notamment des données structurelles provenant de la sismique 3D et pétrophysiques provenant des diaggraphies de puits et de l'inversion de données sismiques 3D.

La méthode CSEM conçue dans ce projet pour la géothermie profonde peut tout naturellement s'appliquer à des contextes géothermiques moins profonds, par exemple en soutien à la géothermie conventionnelle du type Dogger dans le bassin parisien. Elle peut également s'appliquer à la caractérisation d'autres types de circulations de fluides telles que le stockage géologique du CO2 ou de gaz.

## BIBLIOGRAPHIE:

- Vidal J., Hehn R., Glaas c., Genter A. (2019). How can temperature logs guide us to identify permeable fractures and define a conceptual model of fluid circulation? An example with deep geothermal wells in the Upper Rhine Graben, Geofluids, Special Issue on Geofluids and Energy for the XXI Century. Volume 2019, Article ID 3978364, 14 pages, <https://doi.org/10.1155/2019/3978364>.