

## EVALUATION DE LA METHODE EM MULTI-FREQUENTIEL FAIBLE ECARTEMENT EN DOMAINE MARIN PEU PROFOND – APPLICATION A L'ARCHEOLOGIE

SIMON F.X<sup>1,2</sup>, PAPADOPOULOS N.<sup>3</sup>, GUILLEMOTEAU J.<sup>4</sup>, OIKONOMOU D.<sup>3</sup>, SIMIRDANIS K.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Inrap, Paris, France, francois-xavier.simon@inrap.fr

<sup>2</sup> Laboratoire Chrono-Environnement, UMR 6249, UBFC-CNRS, Besançon, France

<sup>3</sup> Laboratoire GeoSat ReSeArch, IMS FORTH, Rethymnon, Grèce

<sup>4</sup> Institut de Géosciences, Université de Potsdam, Allemagne

### RESUME

*En domaine terrestre, le pouvoir de résolution verticale des appareils électromagnétique multi-fréquentiels de faible écartement (<2 m) est souvent limité par le contexte de faible nombre d'induction. En domaine marin, la forte conductivité de l'eau permettrait en théorie une meilleure différenciation verticale dans la gamme de fréquences utilisée ( $10^2 - 10^5$  Hz). Une série de modélisations 1D et 3D ont motivé la réalisation de mesures sur le site archéologique d'Elounda. Les premiers résultats montrent une grande similitude entre les données ERT 3D et EM.*

**Mots clés :** marin faible profondeur, EM multi-fréquentielle, modélisation, archéologie

### ASSESSMENT OF A MULTI-FREQUENCY LOOP LOOP ELECTROMAGNETIC SYSTEM FOR SHALLOW OFF-SHORE MEASUREMENT – ARCHAEOLOGICAL APPLICATION

#### ABSTRACT

*In the land survey area, multi-frequency induction electromagnetic (EMI) loop-loop devices with small spacing (< 2m) often show low induction numbers responses for the quasi-full range of the used frequency ( $10^2 - 10^5$  Hz). On the other hand, in the marine domain, the high conductivity of salt water would theoretically allow different depths of investigation. Motivated by the results of several 1D and 3D simulations, we collected a multi-frequency EMI data set on the archaeological site of Elounda. The first results show a great similarity between previous ERT 3D and EM measurements.*

**Key words:** shallow offshore, multi-frequency EM, simulation, archaeology

#### INTRODUCTION

Les appareils d'induction électromagnétiques (EMI) à source harmonique multi-fréquentielle de type Slingram, à faibles écartements de bobines, étaient destinés initialement à la réalisation de cartographies multi-profondeurs de la conductivité électrique. Ce type de sondage EMI multi-fréquences « vertical » implique que les fréquences utilisées font significativement varier la profondeur d'investigation, ce qui, pour le cas des systèmes Slingram à petit écartement, nécessite des mesures à grand nombres d'induction. Dans la gamme de fréquences utilisée par ces systèmes ( $10^2 - 10^5$  Hz), cette condition est très rarement rencontrée dans le domaine terrestre où les valeurs de conductivités de la très proche surface sont très souvent inférieures à 0.5 S/m (ex., argiles). Pour ce type d'environnement, la profondeur d'investigation de l'appareil est alors essentiellement déterminée par l'écartement et la géométrie des bobines plutôt que par la fréquence de l'émetteur. L'inversion de données multi-fréquentielles collectées en domaine terrestre et non salé s'avèrent donc particulièrement peu contrainte car les différents canaux-fréquences ont une sensibilité verticale quasiment identique. Fort de cette contrainte, ces appareils se sont néanmoins avérés plus intéressants pour des approches multi-paramètres où dans certains contextes, la permittivité diélectrique et la viscosité magnétique peuvent être approchée (Simon et al., 2015 ; Simon et al., 2019). Dans le domaine marin, il en est tout autrement. La forte conductivité du milieu étudié permet de s'extirper du domaine à faible nombre d'induction. Dans ce cadre-là, nous supposons notamment que la couche d'eau salé

amplifie la dépendance fréquentielle des sensibilités verticales, rendant ainsi l'information d'un sondage « multi-fréquence » exploitable pour la caractérisation du milieu sous-jacent. Afin de déterminer la faisabilité d'une telle approche dans le cadre d'une prospection archéologique, nous avons réalisé une étude en deux temps. Nous avons d'abord réalisé des simulations 1D et 3D sur la base d'un modèle réaliste proche des caractéristiques du site test. Nous avons ensuite réalisé un test sur un secteur cartographié à la fois avec la méthode électromagnétique, la méthode électrique (3D ERT) et pour lequel la bathymétrie a été déterminée avec précision.



**Fig. 1** –Acquisition des données EM multi-fréquentielle sur le site d'Elounda (Grèce)

## MATERIEL ET METHODES

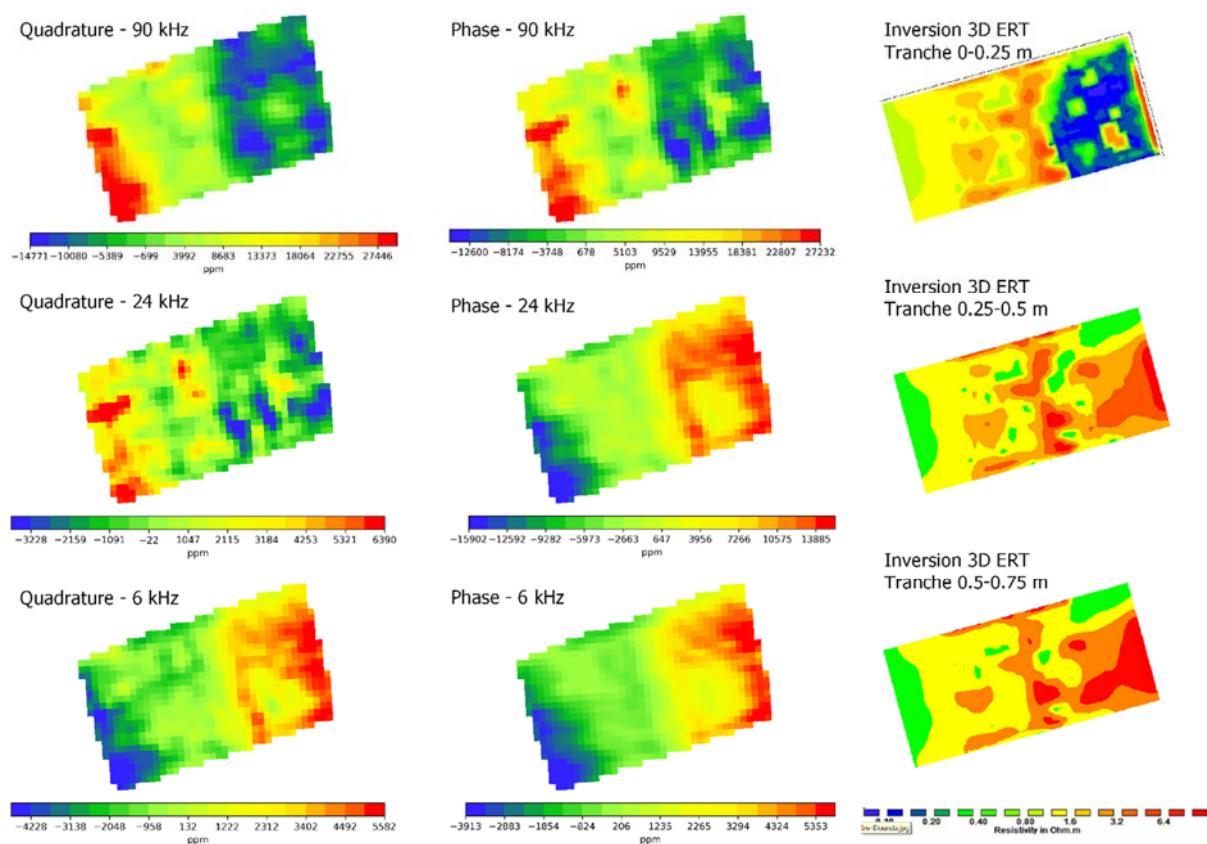
Le choix des appareils EMI multi-fréquentiels disponibles sur le marché s'avère assez restreint. Deux appareils sont actuellement disponibles, l'EMP400 de GSSI et le GEM2 de Geophex. Le premier n'étant plus distribué, notre choix s'est porté sur le GEM2. Celui-ci fournit des mesures sur une gamme de fréquences comprise entre 300 Hz et 90 kHz. Il est possible avec le GEM2 de faire des mesures sur 5 fréquences différentes. Il présente également une assez bonne stabilité mécanique. La présence d'une 'bucking coil' situé à 1.21 m de distance de l'émettrice permet également de réguler la dérive instrumentale. Comme tous les appareils multi-fréquentiels de faibles écartements, il présente le désavantage d'être assez mal calibré en absolu. Dans le domaine marin, la forte intensité du signal mesuré lié à la forte conductivité de l'eau de mer devrait permettre d'éviter ce problème. L'écartement entre la bobine d'émission et de réception est de 1.61 m ce qui permet d'obtenir une résolution latérale satisfaisante et en rapport avec la dimension métrique des structures cartographiées. Le GEM2 est un appareil relativement léger et assez facilement maniable. Nous l'avons disposé sur une plateforme flottante constituée de bouées (Fig. 1). Il peut être directement connecté à un système GNSS si la qualité du positionnement de ce dernier est suffisante. L'acquisition a été effectuée dans un contexte météorologique favorable, afin de ne pas subir d'effets de tangage et de roulis qui auraient pu affecter considérablement la qualité du signal (c'est-à-dire le non-respect de la géométrie - Horizontal CoPlanar choisie).

L'ensemble de ces paramètres instrumentaux ont été pris en compte pour modéliser la réponse de l'appareil en 1D et en 3D. La solution 1D est basé sur la méthode des intégrales et nous a permis de visualiser l'effet des différentes fréquences et de la tranche d'eau de mer. La modélisation 3D a été réalisée avec le code développé par A. Tabbagh au laboratoire Métis (alias Sisyphé), et qui repose sur la méthode des moments (Tabbagh, 1985). Ce code a été adapté pour le GEM2 par A. Tabbagh lors d'une précédente étude (Simon et al., 2015) afin de tenir compte dans la modélisation de l'effet de la 'bucking coil'.

Les premières observations montrent qu'au-dessus d'une tranche d'eau salée, l'utilisation de différentes fréquences permet bien d'étudier la variabilité de la conductivité du sol à des profondeurs variables. La dynamique du signal mesuré est relativement forte pour des tranches d'eau faible mais

lorsque celle-ci devient plus importante, cette dynamique s'atténue très fortement. Pour un appareil situé à 2 m au-dessus du fond de l'eau, le signal devient relativement faible. L'effet de la fréquence varie également en fonction de l'épaisseur de la tranche d'eau. Les sensibilités aux couches profondes et aux couches superficielles en fonction des fréquences de mesures utilisées sont donc étroitement liées à l'épaisseur de la tranche d'eau de mer. Il est donc primordial de connaître avec exactitude l'épaisseur de cette tranche d'eau pour cartographier les variations de conductivités dans le sol, d'où l'importance d'obtenir en complément des mesures EM une bathymétrie relativement fine.

Les résultats des modélisations 3D montrent également que la sensibilité aux variations de conductivités est différente sur le signal en phase et sur le signal en quadrature, mais que la différence observée est largement dépendante de la fréquence utilisée. En accord avec notre hypothèse de départ sur la dynamique du nombre d'induction, les plus basses fréquences (5 kHz) montrent des sensibilités relativement proches alors qu'aux plus hautes fréquences, la différence s'accroît (90 kHz). Nous présenterons au cours de la communication les résultats de ces modélisations 3D.



**Fig. 2** – Cartographie électromagnétique en phase et en quadrature pour 90 kHz, 24 kHz, et 6 kHz – Résultats de l'inversion 3D électrique (Simirdanis et al., 2016)

## RESULTATS EXPERIMENTAUX

Un premier test a été réalisé en août 2020 sur le site archéologique d'Elounda en Grèce. Celui-ci a été choisi car il avait déjà fait l'objet d'une prospection électrique 3D ainsi que d'un relevé bathymétrique précis. La tranche d'eau moyenne sur ce site est de 0.3 m. L'appareil électromagnétique a été positionné sur une plateforme flottante à 0.3 m au-dessus du niveau de l'eau en mode HCP, et connecté à une antenne GPS (Fig. 1). Les résultats observés (Fig. 2) montrent des variations

significatives en phase et quadrature avec même des valeurs négatives, ce qui indique un domaine à haut nombre d'induction. Les cartes de réponse EMI montrent des distributions latérales en cohérence avec les résultats de l'inversion électrique 3D. Les mesures effectuées aux différentes fréquences permettent de dresser des cartes présentant des distributions de la conductivité électrique différentes sur les différentes fréquences. Ces cartes montrent également des distributions latérales dissimilaires suggérant une variation de la profondeur d'investigation. Il faut néanmoins rester vigilant quant aux couplages non-linéaires (spécifique à chaque fréquence) avec l'épaisseur de la couche d'eau salées. Il est néanmoins intéressant de les mettre en regard des résultats de l'inversion électrique 3D (Fig. 2).

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les résultats expérimentaux confirment l'intérêt de la méthode électromagnétique en milieu marin peu profond. Dans ce contexte, un système EMI Slingram multi-fréquence de faible écartement permet une investigation multi-profondeur. Contrairement au milieu terrestre où le sondage « vertical » multi-fréquence est fortement limité par la profondeur d'investigation quasi-identique des différents canaux, la très forte conductivité du milieu marin permet une meilleure résolution verticale de la méthode. La suite de ce travail portera sur l'inversion 1D de données multi-fréquentielles à plus long terme l'inversion 3D. Cette dernière approche nécessitera également un protocole d'acquisition plus robuste que celui utilisé lors de cette première expérimentation avec un échantillonnage spatial permettant de contraindre la forme des anomalies 3D, c'est-à-dire limitant l'aliasing latéral presque systématiquement avéré lorsque la stratégie d'acquisition est pensée pour une interprétation 1D (par exemple la trop grande distance entre les profils).

Si elle s'avère capable de détecter une distribution hétérogène de conductivité en milieu marin, la méthode EMI permettrait donc une acquisition beaucoup moins contraignante à mettre en œuvre que la méthode électrique. Sans inversion, elle est cependant moins résolue que l'inversion 3D ERT. L'inversion des données EMI est donc indispensable si l'on souhaite obtenir des résultats se rapprochant de ceux obtenues en routine avec la méthode électrique.

## Remerciements

Le projet "Cretan cultural landscapes over the time: highlighting the marine and mountainous environment of Mirabello" -DIATOPO fait partie de l'axe prioritaire "Strengthening the competitiveness, innovation and entrepreneurship of Crete" de l'OP. "Crete" 2014-2020 co-financé par le fond européen de développement régional.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**SIMIRDANIS K., PAPADOPOULOS N., CANTORO G., 2016** - Shallow Off-Shore archaeological Prospection with 3-D Electrical Resistivity Tomography: The case of Olous (Modern Elounda), Greece. *Remote Sensing*, 8, 897

**SIMON F.X., SARRIS A., THIESSON J., TABBAGH A., 2015** - Mapping of quadrature magnetic susceptibility/magnetic viscosity of soils by using multi-frequency EMI, *Journal of Applied Geophysics*, 120, 36-47

**SIMON F.-X., TABBAGH A., SARRIS A., DONATI J., 2019** - Permittivity mapping in the VLF-VF range using a multi-frequency EMI device: first tests in archaeological prospection, *Near Surface Geophysics*, 17, 1, 27-41

**TABBAGH A., 1985** - The response of a three-dimensional magnetic and conductive body in shallow depth prospecting. *Geophysical Journal International*, 81(1), 215-230