



**HAL**  
open science

# Modélisation de méthodes électromagnétiques basses fréquences dans le domaine de la géophysique - Application au suivi d'un réservoir en production

Schamper Cyril

► **To cite this version:**

Schamper Cyril. Modélisation de méthodes électromagnétiques basses fréquences dans le domaine de la géophysique - Application au suivi d'un réservoir en production. Rencontres Scientifiques France Grilles 2011, Sep 2011, Lyon, France. hal-00653028

**HAL Id: hal-00653028**

**<https://hal.science/hal-00653028>**

Submitted on 16 Dec 2011

**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.

# **Modélisation de méthodes électromagnétiques basses fréquences dans le domaine de la géophysique – Application au suivi d’un réservoir en production**

Cyril Schamper (1)

(1) [cyril.schamper@upmc.fr](mailto:cyril.schamper@upmc.fr) - UMR7619-Sisyphé, Université Pierre et Marie Curie (France)

## **Overview:**

Low frequency electromagnetic methods from a controlled source (CSEM: Controlled Source ElectroMagnetic) have been applied for a little more than a decade in oil exploration. As a complement to seismic methods, they permit lowering of the risk of «dry holes», since they are more sensitive to the nature of the fluid contained in rock. Because of the numerous successes encountered, and experience acquired, petroleum companies foresee extending application of CSEM to the monitoring of reservoirs under production. The main issues tackled with the monitoring of the oil-water contact are avoiding the loss of production due to the invasion of boreholes by water, and the estimation of the efficiency of improved techniques on the recovery rate for production (EOR : Enhanced Oil Recovery). The interface between oil and water is subject to an essentially lateral displacement due to the low thickness of hydrocarbon reservoirs which have an area that exceeds several square kilometres.

The work of my thesis, done in partnership between UPMC and CGGVeritas, consisted of the theoretical feasibility of the CSEM monitoring of the lateral displacement of the oil-water contact with an apparatus that permits obtaining information on the distribution of fluids above a large area. We were particularly interested in the land case.

During this thesis, two codes had been developed, parallelized and used on cloud computers like the European calculation grid EGEE (VO Egeode). The first uses the semi-analytic Method of Moments for the frequency domain. The second one is based on finite differences in the time domain. The development was more focused on the Method of Moments (code : EM MOM).

The EM MOM code was able to be tested during a cooperative mission with CIPR (Center for Integrated Petroleum Research) at the University of Bergen, Norway. It permitted doing a sensitivity analysis in the frequency domain to identify device geometries better adapted to the monitoring of a hydrocarbon reservoir (depth of 1000 meters). The apparatus that yields the greatest sensitivity consists of a vertical dipole source buried at mid depth between the top of the reservoir and the ground surface, and of horizontal receptors for electrical field set on the ground surface. The level of 4D signal, i.e., the difference of measured field at two different instants («time lapse») remains at a level slightly over the ambient noise, which can largely be eliminated by summation (vertical stacking).

## **Besoin, utilisation de la grille de calcul EGEE**

Dans le cadre d’une étude de sensibilité impliquant l’étude de la réponse de différents modèles synthétiques en 3D, le besoin d’une bonne puissance de calcul est vital pour obtenir des résultats dans un temps imparti. Dans le cadre de ma thèse [1], j’ai modélisé la réponse de corps 3D avec différentes distributions de résistivités électriques corrélées avec la distribution des fluides au sein d’un réservoir en production (la roche saturée en huile et en gaz étant plus résistante électriquement que la roche saturée en eau fortement minéralisée et donc très conductrice).

Le réservoir 3D est discrétisé en cellules parallélépipédiques ayant pour caractéristique physique la résistivité électrique. Au cours de ma thèse, nous avons exploré deux voies. La seconde basée sur les différences finies n'est pas présentée dans cette communication, le travail de thèse s'étant finalement concentré sur la première.

La principale voie abordée, la méthode semi-analytique des moments (ou *Integral Equations*, [2]), consiste à discrétiser uniquement le volume d'un corps 3D (ici un réservoir) à l'intérieur d'une terre tabulaire dont la solution analytique est connue. Le calcul dans le domaine fréquentiel de la réponse de cette terre tabulaire se fait par le biais des fonctions de Green dont le calcul est rendu complexe et demandeur en ressources de calcul par l'estimation numérique des transformées de Hankel [3,4]. Ces formules comprennent de nombreux facteurs en exponentiel, et leur temps de calcul devient très vite prépondérant. En effet, ces fonctions de Green sont appelées pour calculer les interactions entre les cellules composant le corps 3D, et sont de plus intégrées sur le volume des cellules. Pour une hétérogénéité 3D à N cellules, N<sup>2</sup> interactions doivent être estimées, afin de résoudre le système linéaire plein suivant :

$$\underline{E}(r_i) - \sum_{k=1}^N [\delta\sigma_k \underline{E}(r_k) \times \int_{V_k} \underline{G}(r_i, r') dr'] = \underline{E}_B(r_i) \Big|_{i=1, N}$$

avec  $\underline{E}$  le champ électrique total aux centres des cellules de coordonnées  $r_i$ ,  $\delta\sigma_k$  la différence de conductivité électrique entre le corps 3D et la terre tabulaire (appelée aussi *background*),  $\underline{G}$  le tenseur des fonctions de Green qui est intégré sur le volume des cellules, et  $\underline{E}_B$  le champ primaire correspondant à la réponse de la terre tabulaire seule.

Le calcul des interactions  $\underline{G}(r_i, r')$  et la résolution du système linéaire plein présenté ci-dessus nécessite l'utilisation de plusieurs processus en parallèle pour la simulation de la réponse de modèles avec un grand nombre de cellules, surtout au niveau de la puissance CPU.

Pour répondre à la problématique de ma thèse, j'ai développé un code en Fortran 90 et utilisant la librairie de parallélisation MPI (appelé EM\_MOM). La répartition des calculs s'est faite au niveau des appels des fonctions de Green (permettant d'initialiser le système linéaire), et de la résolution du système (méthode itérative BI-CGSTAB). Les jobs soumis sur la grille de calcul EGEE ont utilisé en moyenne 8 à 16 processeurs, pour un nombre maximal de cellules de 100 000, et avaient une durée d'exécution d'une à deux heures. Le nombre important de processeurs sur la grille m'a permis de faire tourner fréquemment plusieurs jobs en même temps (en dessous de la dizaine), et de conduire une étude de sensibilité dont une partie est présentée dans la suite de ce résumé.

### Résultats scientifiques :

L'utilisation du code EM\_MOM sur la grille de calcul a permis d'effectuer l'étude de sensibilité du suivi par méthodes E.M. d'un réservoir type situé au sommet d'un dôme (Figure 1). Le but du suivi est de pouvoir observer l'évolution latérale du front huile/eau lors de la production, afin de connaître l'efficacité de celle-ci (par exemple dans le cas d'une injection de liquide ou de gaz pour aider l'extraction), et également pour des raisons de sécurité et de coût, un puits de production étant considéré comme perdu une fois envahi par l'eau.

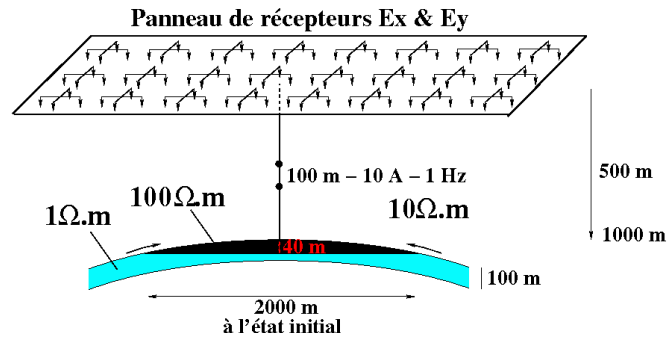


Figure 1 : Schéma du dispositif électromagnétique pour le suivi d'un réservoir localisé au sommet d'un dôme. La source E.M. est un dipôle électrique orienté verticalement (le cas d'un dipôle horizontal a également été étudié), et les récepteurs mesurent les composantes horizontales du champ électrique à la surface du sol.

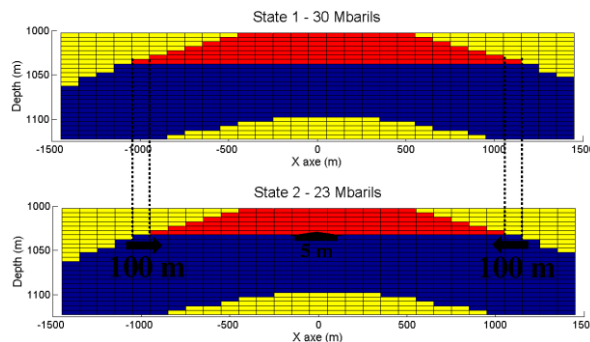


Figure 2 : Modèle synthétique de réservoir étudié dans le cadre de l'étude de sensibilité du déplacement latéral de l'interface huile/eau. Le déplacement latéral de 100m de l'interface huile/eau (rouge/bleu), lors du passage de l'état 1 à l'état 2, s'accompagne d'une montée de 5m.

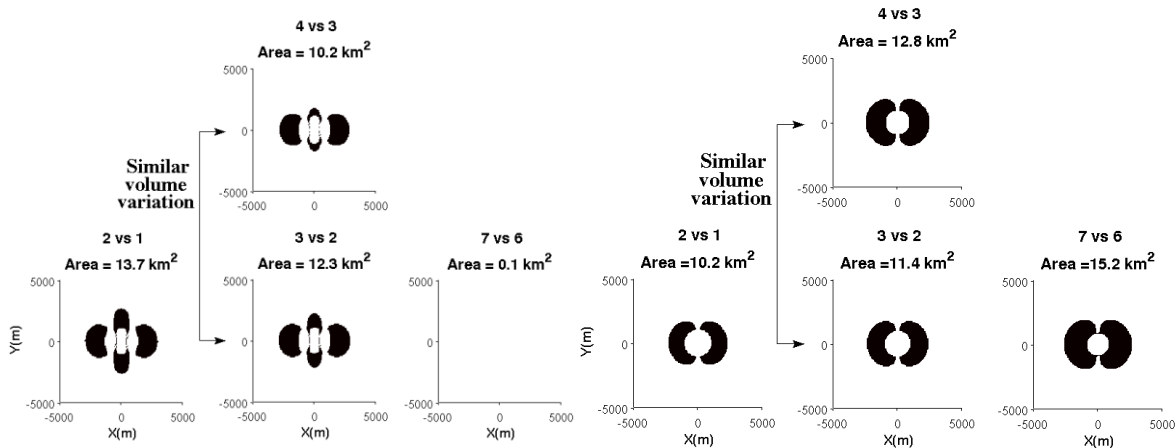


Figure 3: Zone de mesurabilité du signal électromagnétique 4D entre deux états du réservoir. La zone est déterminée suivant les conditions suivantes: variation >1% et >1nV/m. Les états successifs du réservoir en production sont numérotés de 1 à 7, les derniers correspondant à ceux où l'interface huile/eau est la plus proche du toit du dôme, et où le volume de substitution est le moins important. A gauche: pour un dipôle source horizontal. A droite : pour un dipôle source vertical.

Les cellules du réservoir ont une dimension de 100m x 100m x 5m (Figure 2). Ainsi, pour chaque étape de production le front huile/eau se déplace latéralement de 100m pour une montée de 5m. Le déplacement est donc principalement latéral, et le volume de substitution de fluide devient de moins en moins important à mesure que l'interface

s'approche du toit du dôme. Or, il est important de pouvoir continuer à observer l'évolution du front huile/eau, même lorsque le volume impliqué est faible. L'étude de sensibilité (qui a abouti à la publication d'un article [5], et également à une communication à la SEG [6]), a eu pour principal but de déterminer la sensibilité de différentes géométries de dispositifs (dipôle source vertical ou horizontal). Le dispositif composé d'un dipôle source vertical combiné avec des récepteurs des composantes horizontales du champ électrique, a montré une sensibilité à un niveau toujours acceptable, même lorsque le volume de substitution est faible (partie droite de la Figure 3). Avec un dipôle source horizontal, le dispositif est plus sensible au volume global de substitution, et devient vite insensible aux variations latérales lorsque le volume devient faible (partie gauche de la Figure 3).

### **Impressions et perspectives :**

L'accès aux ressources de calcul de l'université pouvant être limité lors de certaines périodes, j'ai été intéressé par tous les moyens de calcul auxquels je pouvais avoir accès, notamment la grille de calcul EGEE qui m'a été présentée par G. Vétois et J.B. Favreau de CGGVeritas qui administraient la VO Egeode. Leurs aides et conseils ont été précieux, l'ensemble de l'environnement (UI & commandes pour soumettre les jobs) étant assez complexe. Une simplification de cette interface permettrait une plus grande démocratisation d'outils comme la grille EGEE qui a le mérite de permettre le partage et une meilleure utilisation des puissances de calcul répartis dans les différentes unités de recherche.

Dans le cadre de mes recherches sur la modélisation 3D des méthodes électromagnétiques appliquées à la géophysique, l'utilisation de serveurs de calculs comme ceux accessibles via la grille me seront toujours nécessaires. J'ai notamment travaillé sur les différences finies dans les domaines fréquentiel et temporel sans avoir eu jusqu'ici le temps d'appliquer ces codes sur des modèles réalistes. Je souhaiterais également faire tourner des modèles plus complexes avec le code EM\_MOM, en atteignant un nombre de cellules de l'ordre de 1 000 000 au lieu de 100 000 actuellement. Ceci requerra une meilleure optimisation au niveau des échanges MPI, et des tests à plus grande échelle sur un nombre de processeurs dépassant la quinzaine utilisée jusqu'à présent.

### **Références :**

- [1] Schamper, C. (2009), Etude par simulation du suivi d'un réservoir en production par méthodes ElectroMagnétiques, thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- [2] Zhdanov M.S. (2009), Geophysical Electromagnetic Theory and Methods, Elsevier.
- [3] Xiong Z. (1989), Electromagnetic fields of electric dipoles embedded in a stratified anisotropic earth, *Geophysics* 54, 1643-1646.
- [4] Guptasarma, D., and B. Singh (1997), New digital linear filters for Hankel J0 and J1 transforms, *Geophysical prospecting*, 45 (5), 745-762.
- [5] Schamper, C., F. Rejiba, A. Tabbagh, and S. Spitz (2011), Theoretical analysis of long offset time-lapse frequency domain controlled source electromagnetic signals using the method of moments: Application to the monitoring of a land oil reservoir, *J. Geophys. Res.*, 116, B03101.
- [6] Schamper C., Spitz S., and Rejiba F., 2009, 4D CSEM feasibility study: a land example. *SEG, Houston (October 25-30, 2009) Technical Program Expanded Abstract, 3850-3854.*