

# Développement d'un appareil de sondage électromagnétique aux fréquences intermédiaires (100 kHz – 10 MHz) pour la mesure de l'humidité dans les terrains superficiels

Bernard Bourgeois, Alain Tabbagh, Claude Cavoit, Isabelle Cousin

## ► To cite this version:

Bernard Bourgeois, Alain Tabbagh, Claude Cavoit, Isabelle Cousin. Développement d'un appareil de sondage électromagnétique aux fréquences intermédiaires (100 kHz – 10 MHz) pour la mesure de l'humidité dans les terrains superficiels. 6. Colloque Géophysique des Sols et des Formations Superficielles GEOFCAN, Sep 2007, Bondy, France. hal-02757741

**HAL Id: hal-02757741**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02757741>**

Submitted on 4 Jun 2020

**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.

# Développement d'un appareil de sondage électromagnétique aux fréquences intermédiaires (100 kHz – 10 MHz) pour la mesure de l'humidité dans les terrains superficiels.

B. BOURGEOIS<sup>(1)</sup>, A. TABBAGH<sup>(2)</sup>, C. CAVOIT<sup>(3)</sup>, I. COUSIN<sup>(4)</sup>

(1) BRGM, Service Aménagement et Risques Naturels, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2

(2) UMR 7619 Sisyphe, UPMC, Paris VI

(3) LPCE, 3A Avenue de la Recherche Scientifique, 45071 Orléans Cedex 2

(4) INRA d'Orléans, Unité des Sciences du Sol, BP 20619, 45166 Olivet Cedex

## Abstract

BRGM is currently developing a multi-frequency electromagnetic sounding system operating in the intermediate frequency range (100 kHz – 10 MHz). This development is carried out in collaboration with UMR Sisyphe, LPCE and INRA, in the framework of the "EMFI" PNRH project. The aim of the project is a) to show the technical viability of a slingram-type geophysical instrument in this new frequency range, b) to prove the capability of such an instrument for the simultaneous and high-resolution determination of the subsurface permittivity  $\epsilon$  and resistivity  $\rho$ , and c) to validate the interest of such measurements in hydrogeology for the estimation of the water content and water salinity of the near-surface layers.

## Introduction

Le BRGM développe actuellement un prototype d'appareil de sondage électromagnétique (EM) aux fréquences intermédiaires (100 kHz – 10 MHz) en collaboration avec l'UMR Sisyphe, le LPCE (Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement) et l'INRA d'Orléans, dans le cadre du projet « EMFI » soutenu par le PNRH (convention n° 05CV125).

Les fréquences « intermédiaires » sont les fréquences situées à la charnière entre EM diffusif ( $F \leq 50$  kHz) et EM propagatif ( $F \geq 30$  MHz). Alors que le domaine diffusif est exploité de longue date par les méthodes EM classiques (galvaniques ou inductives) et que le domaine propagatif est exploité depuis une vingtaine d'années par le radar géologique, les fréquences intermédiaires n'ont encore jamais été exploitées en géophysique — seuls quelques prototypes utilisant ces fréquences ont été développés dans des universités Américaines.

Cette gamme de fréquences présente pourtant des avantages considérables pour la reconnaissance détaillée des paramètres électriques des formations superficielles :

- d'une part, elle offre une résolution verticale d'ordre métrique, sur une profondeur d'investigation de dix à vingt mètres (figure 1), ce que ne permettent ni les fréquences radar, limitées à une profondeur d'investigation très faible (d'ordre métrique dans la plupart des sols humides de régions tempérées), ni les fréquences diffusives qui sont trop intégrantes et procurent une résolution verticale médiocre (>20 m) ;
- mais surtout, cette gamme est sensible à la fois à la permittivité ( $\epsilon$ ) et à la résistivité ( $\rho$ ) : une seule mesure<sup>5</sup> dans la gamme des fréquences intermédiaires permet de déterminer simultanément (et sans ambiguïté) la permittivité et la résistivité de la zone sondée — alors que les fréquences diffusives renseignent uniquement sur la résistivité et que les fréquences radar renseignent principalement sur la permittivité. Sachant que la permittivité à une fréquence donnée est reliée presque exclusivement (et de manière bijective) à la teneur en eau — à la différence de la résistivité qui est également influencée par la salinité de l'eau interstitielle — une mesure EMFI devrait permettre d'estimer simultanément la teneur en

<sup>5</sup> Mesure d'une seule composante géométrique du champ à une seule fréquence et à un seul offset.

eau du volume sondé (à partir de la permittivité) et la salinité de son eau d'imbibition (à partir de la résistivité), comme nous le verrons plus loin.

Ces propriétés remarquables permettent d'envisager de nombreuses applications pour cette nouvelle gamme de fréquences en géophysique, dans tous les domaines où l'humidité joue un rôle important et où une bonne résolution spatiale est nécessaire. Outre l'étude de la zone non saturée (ZNS) et de la partie supérieure de la nappe pour l'hydrogéologie (risque sécheresse-inondation) ou l'agronomie (irrigation, transferts de polluants), cibles prioritaires du projet EMFI, on peut imaginer de nombreuses applications en géotechnique (reconnaissance de digues et autres terrassements, recherche de cavités vides ou ennoyées), en environnement (contrôle des argiles de confinement, pollutions minérales ou organiques), ou en archéologie.

Malgré ces propriétés attractives, il n'existe pas à ce jour d'appareil EM commercial aux fréquences intermédiaires. Cette lacune peut s'expliquer à la fois par des causes historiques et techniques. Du côté des basses fréquences, les méthodes EM diffusives, à vocation essentiellement minière, ont longtemps privilégié la profondeur d'investigation sur la résolution ; elles n'avaient donc pas intérêt à trop monter en fréquence. En outre, les difficultés apparaissant au dessus de 100 kHz (couplages capacitifs, rayonnements parasites, numérisation, ...) ont longtemps été insurmontables et certains verrous n'ont pu être levés que récemment. Du côté des fréquences radar, l'augmentation de taille des antennes (en  $1/F$ ) requise par l'abaissement de la fréquence et une certaine répugnance à travailler en champ proche (où les lois de l'optique ne s'appliquent plus) expliquent certainement l'absence de développement au dessous de 30 MHz. Enfin, il est probable que le domaine intermédiaire ait longtemps été évité en raison de sa complexité physique, puisque aucune simplification des équations n'y est possible.

Pour combler cette lacune, le projet EMFI s'est fixé les objectifs suivants : a) montrer qu'un appareil de type slingram fonctionnant dans la gamme intermédiaire est techniquement réalisable et évaluer les difficultés liées à sa construction ou à son utilisation ; b) confirmer par l'expérience qu'un tel appareil est capable de fournir simultanément et avec une grande résolution spatiale les paramètres électriques ( $\varepsilon$ ,  $\rho$ ) des terrains superficiels ; c) valider son utilisation en hydrogéologie pour l'estimation des paramètres hydriques du proche sous-sol (teneur en eau et salinité de l'eau).

## Démarche scientifique

Chacun sait que l'eau joue un rôle majeur dans les propriétés électriques (conductivité  $\sigma$ , permittivité relative  $\varepsilon_r$ ) des formations poreuses superficielles.

La loi empirique d'Archie (1942), vérifiée par la plupart des matériaux poreux, atteste que la conductivité de la roche est très sensible à la teneur en eau. La forme généralisée de cette loi, valable en milieu non saturé, relie la conductivité  $\sigma$  de la roche à sa porosité  $\Phi$  et à la saturation en eau  $S_w$  (fraction volumique d'eau dans les pores) par le biais d'exposants  $m$  et  $n$ , dits de cimentation et de saturation, qui sont le plus souvent proches de 2 :

$$\sigma \approx \sigma_w \Phi^m S_w^n \quad (\text{où } m \in [1.5, 3] \text{ et } n \approx 2) \quad (1)$$

En faisant intervenir la teneur en eau volumique  $\theta_v = \Phi \times S_w$ , cette loi peut encore s'écrire :

$$\sigma \approx \sigma_w \theta_v^m S_w^{n-m} \quad (\text{où } n-m \text{ est généralement beaucoup plus petit que } m) \quad (2)$$

Cette formulation montre que le terme le plus influent dans la conductivité globale est la teneur en eau volumique  $\theta_v$  : celle-ci est affectée par un exposant voisin de 2, alors que le terme de saturation  $S_w$  est affecté par un exposant généralement proche de zéro ( $|n-m| \leq 0.5$  dans la plupart des cas). En pratique, le terme  $S_w^{n-m}$  est le plus souvent compris entre 0.5 et 1 et on peut en première approximation l'assimiler à 1, pour obtenir une loi d'Archie simplifiée :

$$\sigma \approx \sigma_w \theta_v^m \quad (3)$$

Il n'y a que dans les matériaux très meubles ou très argileux que l'exposant de cimentation  $m$  peut s'écarter notablement de 2 et que l'exposant  $n-m$  dans l'expression (2) peut devenir significatif. Dans ce cas, si la roche est très sèche, le terme de saturation  $S_w^{n-m}$  peut s'écarter notablement de 1 et

compliquer le problème. Cependant, dans la plupart des cas, la conductivité  $\sigma$  donnée par l'expression (3) est exacte à mieux qu'un facteur 2, ce qui permet d'estimer  $\theta_v$  à moins de 40% d'erreur.

Cependant, la loi d'Archie montre aussi que la conductivité de la roche dépend linéairement de la conductivité  $\sigma_w$  de l'eau interstitielle. Bien que cette conductivité intervienne seulement à la puissance 1 (alors que l'exposant  $m$  qui affecte  $\theta_v$  est proche de 2), c'est elle qui a, en pratique, la plus forte influence sur la conductivité des roches. En effet, la gamme de variation de  $\sigma_w$  dans les milieux naturels est de plusieurs décades : entre une eau douce à 0.2 g/l de NaCl et une eau de mer à 25 g/l, la résistivité varie d'un facteur 100 (de 30 à 0.3 ohm.m). L'erreur qui peut en résulter sur l'estimation de  $\theta_v$  peut donc atteindre un facteur 10 ( $\approx 100^{-m}$ ). On retiendra qu'il est impossible d'estimer la teneur en eau du sous-sol à partir d'une mesure de résistivité si l'on ne connaît pas la conductivité (ou la salinité) de l'eau d'imbibition, même dans un milieu géologique connu.

En revanche, l'eau influence également la permittivité des roches : de par son caractère fortement dipolaire, la molécule d'eau jouit d'une forte polarisation d'orientation qui lui confère une grande constante diélectrique. Or, cette propriété est beaucoup moins dépendante de la salinité que la résistivité : entre une eau douce et l'eau de mer, la constante diélectrique ne varie que de 5% (de 81 à 77), alors que la résistivité, on l'a vu, est divisée par un facteur 100.

La loi empirique établie par Topp *et al.* (1980) pour des sols de textures variées à divers degrés de saturation relie la constante diélectrique  $\varepsilon_r$  de la roche à sa teneur en eau volumique  $\theta_v$  par le biais d'un polynôme du 3<sup>ème</sup> degré :

$$\varepsilon_r \approx 3.03 + 9.3 \theta_v + 146 \theta_v^2 - 76.7 \theta_v^3 \quad (\text{où le terme du } 2^{\text{ème}} \text{ degré est dominant}) \quad (4)$$

En faisant varier la salinité de l'eau jusqu'à 2 g/l de NaCl (eau saumâtre), ces auteurs n'ont pas observé de variation mesurable de la permittivité. Pour de plus fortes salinités de l'eau, on peut cependant imaginer que la formule (4) devrait être multipliée par le ratio  $\varepsilon_{rw}/81$  (permittivité de l'eau salée divisée par celle de l'eau douce), ce qui reste parfaitement négligeable.

Par conséquent, la permittivité est plus appropriée que la résistivité pour quantifier la teneur en eau d'une roche poreuse indépendamment de la salinité de son eau d'imbibition.

L'étude globale de l'humidité superficielle requiert cependant la mesure simultanée de  $\sigma$  et  $\varepsilon_r$  si l'on veut estimer à la fois la teneur en eau et la salinité de l'eau : une fois estimée la teneur en eau  $\theta_v$  à partir de la permittivité  $\varepsilon_r$  par une loi empirique de type Topp (sans *a priori* sur  $\sigma_w$ ), on peut en effet déterminer la conductivité de l'eau  $\sigma_w$  (donc sa salinité) à l'aide de la loi d'Archie dans laquelle  $\sigma$  et  $\theta_v$  sont connus. Le cas particulier des milieux où  $n-m$  est notablement non nul (milieux très argileux ou très meubles) demandera un étalonnage spécifique.

L'estimation de la permittivité d'une roche est actuellement possible par EM radar, mais la profondeur d'investigation est très limitée dans les sols humides ( $\leq 1$  m). Une autre estimation de la permittivité est possible à basse fréquence ( $\leq 1$  kHz) par PP spectrale, mais les phénomènes de polarisation sont plus complexes, faisant intervenir la polarisation d'interface (effets Maxwell-Wagner) en plus de la polarisation dipolaire de l'eau. La solution la plus prometteuse semble donc être la mesure EM aux fréquences intermédiaires.

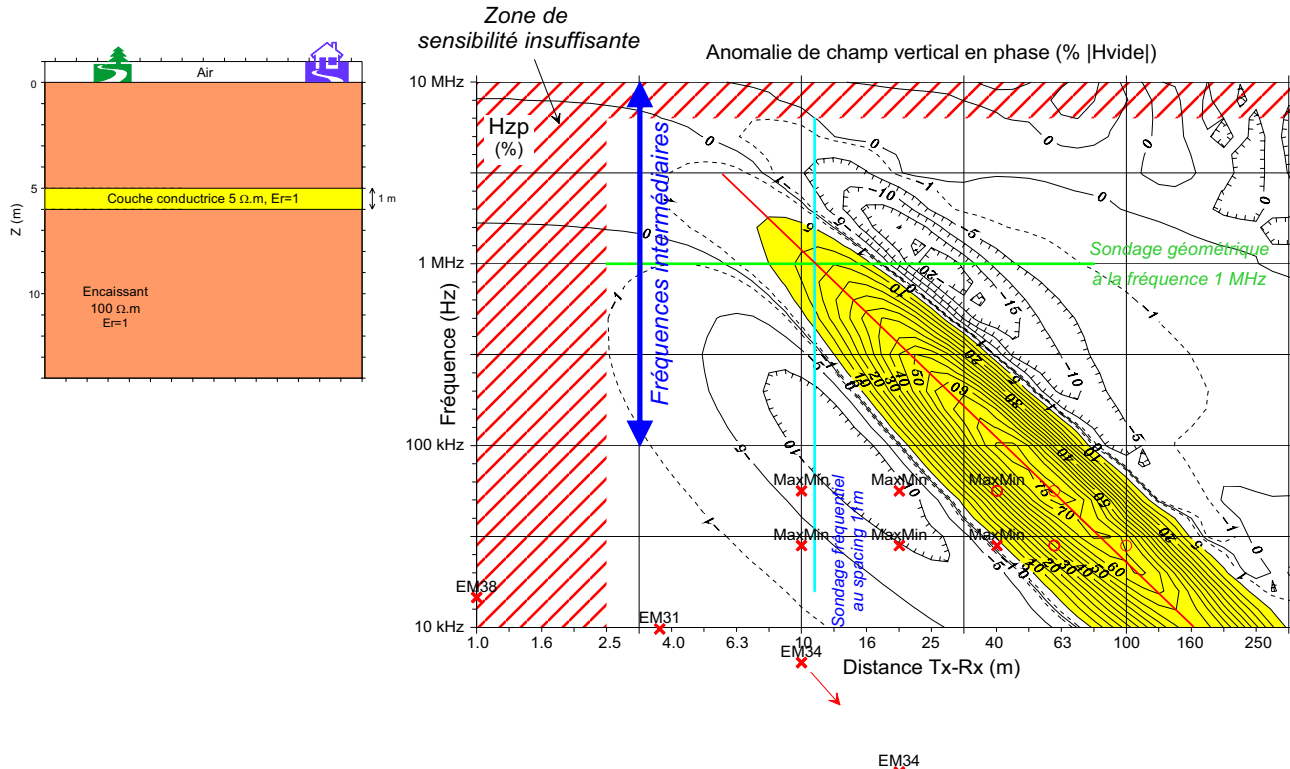
### **Spécifications du prototype « EMFI » (EM aux Fréquences Intermédiaires)**

L'appareil développé est de type slingram, où l'émetteur et le récepteur sont de type magnétique (boucles fermées générant ou recevant un champ magnétique). L'appareil propose 8 fréquences réparties entre 97.6 kHz et 12.5 MHz, en progression géométrique de raison 2. Le spacing peut varier de 2.5 à 40 m pour assurer une bonne capacité à sonder verticalement. Le capteur magnétique est une variante d'un capteur développé au LPCE pour l'exploration spatiale. L'antenne d'émission est une boucle mono-spire accordée délivrant des moments magnétiques importants (ex : 3 Am<sup>2</sup> à 12 MHz). La numérisation est assurée par une carte NI-5122 montée sur châssis PXI. La difficulté majeure réside dans les couplages parasites dans les câbles de raccordement. Le prototype est en voie d'achèvement et subira prochainement ses premiers tests sur le terrain.

## Références bibliographiques

Archie, G. E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Am. Inst. Min. Metallurg. Petr. Eng., Tech. paper 1422, vol. 146, 54-62.

Topp, G.C., Davis, J.L., and Annan, P., 1980, Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines, Water Resour. Res., 16 (3), 574-582.



**Figure 1** - Anomalie de champ magnétique en phase, en configuration HCP (boucles coplanaires horizontales), créée à la surface d'un demi-espace conducteur ( $\rho=100$  ohm.m,  $\epsilon_r=1$ ) par une strate horizontale conductrice ( $\rho=5$  ohm.m,  $\epsilon_r=1$ ) de 1 m d'épaisseur, enfouie à 5 m de profondeur. L'anomalie est normalisée par le champ dans le vide et représentée en isovalues en fonction du spacing et de la fréquence dans un diagramme bilogarithmique. Il apparaît que le meilleur compromis entre niveau de réponse et résolution latérale est obtenu autour de 1 MHz, soit au centre de la gamme intermédiaire. Parmi les appareils existants, celui qui assure la meilleure détection/reconnaissance de la strate est le MaxMin à 56 kHz, pour un jeu de spacings allant de 25 à 125 m (si le spacing est limité à 25 m, on ne verra que le terrain supérieur ; s'il est limité à 60 m, on ne verra pas le troisième terrain et on conclura à un modèle à deux couches) ; la résolution latérale est cependant médiocre, puisqu'une couche ayant une extension horizontale inférieure à 100 m sera probablement mal reconnue avec un tel dispositif. En revanche, un sondage géométrique à 1 MHz fournira une bonne interprétation de la couche pour un jeu de spacings allant de 7 à 30 m, assurant ainsi une bien meilleure résolution latérale (même si le niveau de réponse est plus faible qu'à 100 kHz). La couche pourra aussi être résolue en sondage fréquentiel avec un spacing de l'ordre de 10 m et pour des fréquences allant de 100 kHz à 5 MHz.