

## 1 DOSSIER THÉMATIQUE : GESTES RITUELS. DE LA TRACE À L'INTERPRÉTATION

### ACTUALITÉ DE LA RECHERCHE

### GÉOSCIENCES ET ARCHÉOLOGIE : INTERACTIONS, COMPLÉMENTARITÉS ET PERSPECTIVES

- 114 Bruno GAVAZZI**  
Heureuses rencontres. Vers le développement d'approches intégrées en géosciences et archéologie
- 119 Jean-Paul BRAVARD**  
Dialogue interdisciplinaire : de l'unité stratigraphique aux interactions culture-environnement
- 129 Ferréol SALOMON**  
Les origines d'Ostie : quelles interactions avec la dynamique d'embouchure ? (Delta du Tibre, Italie)
- 141 Quentin BORDERIE, Rowena Y. BANERJEA, Stéphane BONNET, Yannick DEVOS, Cristiano NICOSIA, Christophe PETIT, Ferréol SALOMON, Nathalie SCHNEIDER, Barbora WOUTERS, & Patrice WUSCHER**  
Géoarchéologies des contextes urbains : mieux comprendre les modalités de l'artificialisation des géosystèmes
- 158 Patrice WUSCHER, Christophe JORDA, Quentin BORDERIE, Nathalie SCHNEIDER & Laurent BRUXELLES**  
De la formation géologique à la tranchée : trouver et comprendre les sites archéologiques menacés par les travaux d'aménagement du territoire
- 176 Morgan MILLET & Michel GUÉLAT**  
Les vestiges antiques de Rennaz-Noville (Vaud, Suisse) et leur contexte sédimentaire : nouvelles évidences de l'écroulement du *Tauredunum*
- 188 Théophile PIAU, François BÉTARD, Fabienne DUGAST, Gilles ARNAUD-FASSETTA & Vincent VIEL**  
Dynamique géomorphologique holocène et occupation humaine dans le bassin-versant de l'Eure (Bassin de Paris, France) : potentiels d'une approche géoarchéologique multiscalaire et diachronique
- 205 Dominique SCHWARTZ, Vincent ROBIN, Pierre ADAM, Philippe SCHAEFFER, Anne GEBHARDT, Pierre-Alexis HERRAULT, Benjamin KELLER, Daniele DAPIAGGI, Claire STEVENEL, Maxime THISS, Martine TRAUTMANN & Damien ERTLEN**  
Les géosciences au service de l'archéologie agraire. Une étude de cas sur les rideaux de culture de Goldbach (68)
- 217 Étienne MANTEL, Stéphane DUBOIS, Jonas PARÉTIAS, Victor VISQUESNEL-SCHLOSSER, Corentin VOISIN, Bruno GAVAZZI & Matthieu RICHARD**  
Étudier l'occupation d'une ville : les enjeux du PCR « Topographie générale et insertion territoriale de l'agglomération antique de *Briga* »
- 231 Charlène MOREL**  
Un modèle pour comprendre l'influence de l'état de la recherche, des processus post-déposition et de l'attractivité sur la découverte des sites archéologiques dans le Kochersberg (Bas-Rhin, Alsace, Grand-Est, France)
- 241 Lizzie SCHOLTUS**  
Spatialisation des découvertes, modélisation du passé. L'informatique au service de l'archéologie
- 254 Guillaume HULIN & François-Xavier SIMON**  
Inrap et géophysique : vers une approche raisonnée
- 260 Hugo REILLER, Matthieu FUCHS, & Bruno GAVAZZI**  
Approche multi-méthodes expérimentale pour l'étude d'un site d'occupation romaine et médiévale à Horbourg-Wihr
- ▶ **272 François-Xavier SIMON, Julien GUILLEMOTEAU, Guillaume HULIN, Joachim RIMPOT, Julien THIESSON & Alain TABBAGH**  
De nouvelles perspectives pour les applications des méthodes électromagnétiques basse fréquence en archéologie
- 283 Rémy WASSONG & Bruno GAVAZZI**  
Apport des prospections magnétiques haute résolution à la compréhension d'un habitat protohistorique : l'exemple du site de hauteur fortifié du Maimont
- 294 VARIA**

## DE NOUVELLES PERSPECTIVES POUR LES APPLICATIONS DES MÉTHODES ÉLECTROMAGNÉTIQUES BASSE FRÉQUENCE EN ARCHÉOLOGIE

François-Xavier SIMON<sup>1,2</sup>, Julien GUILLEMOTEAU<sup>3</sup>, Guillaume HULIN<sup>1,4</sup>,  
Joachim RIMPOT<sup>1</sup>, Julien THIESSON<sup>4</sup>, Alain TABBAGH<sup>4</sup>

<sup>1</sup> *Inrap, Direction Scientifique et Technique*

<sup>2</sup> *Université Bourgogne Franche-Comté, CNRS, UMR 6249 Chrono-Environnement*

<sup>3</sup> *Université de Potsdam, Institut des Sciences de la Terre et Environnementales*

<sup>4</sup> *Sorbonne Université, CNRS, EPHE, UMR 7619 Metis*

### RÉSUMÉ

La méthode électromagnétique basse fréquence (ou EMI pour ElectroMagnetic Induction), située à la croisée des méthodes magnétique, électrique et radar, offre de nombreuses possibilités de développement mais subit également d'importantes contraintes techniques. Malgré des développements instrumentaux initiés dans les années 60, son utilisation a longtemps été limitée en archéologie à la cartographie de la conductivité électrique apparente et/ou de la susceptibilité magnétique soit sur des surfaces restreintes soit avec des stratégies à large maille. Depuis la fin des années 2000, du fait de leur application en science du sol, les méthodes EMI se sont plus largement diffusées. Les appareils mono-fréquence et mono-récepteur ont ouvert la voie à des appareils multi-récepteurs et multi-fréquences avec des perspectives très larges en termes de caractérisation spatiale 3D des structures cartographiées comme d'analyse des propriétés physiques des sols. Le développement de systèmes tractés et automatisés a permis à cette méthode de trouver une place dans l'archéologie du paysage. Ce progrès technique, qui s'est traduit par une quantité importante de données, a prévalu sur un travail théorique approfondi illustré aujourd'hui par l'inversion de données et l'analyse des sensibilités aux différentes propriétés géophysiques qui ouvrent de larges perspectives. Nous évoquerons les limites instrumentales auxquelles ces applications doivent faire face mais sont souvent négligées par les utilisateurs de ces méthodes. Nous présenterons également le résultat de modélisations 1D et 3D.

#### MOTS-CLÉS

Prospection électromagnétique, inversion, susceptibilité magnétique complexe, conductivité électrique, permittivité diélectrique.

The low-frequency electromagnetic method (or EMI for ElectroMagnetic Induction), at the crossroads of the magnetic, electrical and GPR methods, offers many possibilities of development but is also limited by important technical constraints. In spite of instrumental developments initiated during the sixties, their use has long been limited in archaeology to the mapping of apparent electrical conductivity and/or magnetic susceptibility over restricted areas or with wide mesh sampling strategies. Since the end of the 2000s, due to their application in soil science, EMI methods have been widely diffused. Multi-coils and multi-frequency systems have replaced single-frequency and single-receiver devices, then opening up new perspectives in terms of 3D spatial characterization of buried features but also in terms of soil properties analysis. The development of towed systems has allowed application to landscape archaeology. This technical advance, which has been expressed in terms of amount of measurement, has prevailed over in-depth theoretical work nowadays illustrated by data inversion and analyses of sensitivity to the different geophysical properties. These two specific points, however, open up the soundness perspectives to future applications. We will discuss the instrumental limitations to which these applications face and which are often neglected by practitioners. We will also present the results of 1D and 3D modelling.

#### KEYWORDS

Electromagnetic survey, inversion, complex magnetic susceptibility, electrical conductivity, dielectric permittivity.

*Article accepté après évaluation par deux experts selon le principe du double anonymat*

Les méthodes électromagnétiques basse fréquence (<100kHz) ont très tôt trouvé leur place parmi les techniques pouvant être mises en œuvre pour la prospection archéologique. En effet, dès la fin des années 40, il a été démontré que les amas de tuiles et de terres cuites étaient à même de perturber les appareils électromagnétiques destinés à la détection de métaux [1]. Dès les années 60, des prototypes ont été construits et mis en œuvre sur le terrain [2]. Cependant, ce n'est que dans les années 70 qu'on a pu disposer d'appareils fréquentiels de type Slingram adaptés à la prospection archéologique [3]. Ces appareils à bobines, ou dipôle-dipôle sont aujourd'hui appelés EMI (pour ElectroMagnetic Induction). Ceux-ci ont connu un très fort développement dans les applications en agronomie pour la mesure de la conductivité électrique des sols [4]. Ils se sont avérés très robustes et relativement faciles d'utilisation mais seules quelques équipes spécialisées dans les méthodes électromagnétiques les ont mis en œuvre sur des sites archéologiques où ils permettent une cartographie simultanée de la conductivité électrique et de la susceptibilité magnétique [5].

Afin d'évaluer la pertinence et la nouveauté des approches actuellement développées avec les appareils électromagnétiques basse fréquence, il faut revenir brièvement (I) sur les principes physiques qui servent de base dans l'interprétation du signal électromagnétique, (II) sur les caractéristiques des propriétés géophysiques mesurées et leur liens avec les matériaux présents sur un site archéologique et (III) prendre en compte les facteurs techniques et électroniques qui contraignent la mise en œuvre des appareils sur le terrain.

Malgré ces contraintes, les méthodes électromagnétiques permettent aujourd'hui de s'intéresser à de nouvelles thématiques, dépassant largement une mise en œuvre orientée vers la seule cartographie de la conductivité électrique apparente des sols, plus simple à mesurer en pratique. Ces développements s'articulent autour de deux axes de recherche avec, d'une part la caractérisation multipropriété des sols, amorcée dès les années 70 et reposant aujourd'hui sur la disponibilité d'appareils multi-fréquences stables, et

d'autre part la restitution 3D des objets cartographiés rendue possible par la commercialisation d'appareils comportant plusieurs bobines réceptrices permettant les mesures à plusieurs profondeurs. Cet article, loin de se vouloir exhaustif sur ces questions, a pour ambition de situer les potentialités et développements futurs concernant les méthodes électromagnétiques. Ces développements font actuellement l'objet du projet ArchEM soutenu par la Direction Scientifique et Technique de l'Inrap en collaboration étroite avec les Universités de Potsdam et de Ghent ainsi qu'avec le laboratoire Metis (Sorbonne Université).

## RAPPEL THÉORIQUE

Le fonctionnement des appareils électromagnétiques à basse fréquence est fondé sur l'émission d'un champ électromagnétique primaire qui se diffuse dans l'air et le sol. Dans le sol, ce champ induit une réponse, à l'origine d'un champ électromagnétique secondaire. Le signal mesuré par la ou les bobines de réception est la somme de ce champ primaire et de ce champ secondaire. Il dépend des caractéristiques géométriques (espacement entre les bobines émettrice et réceptrice, hauteur des bobines au-dessus du sol, orientation des bobines) et de la fréquence utilisée. Le champ secondaire est gouverné par les propriétés électromagnétiques du sol au nombre de trois : la conductivité électrique, la susceptibilité magnétique, la permittivité diélectrique. Le signal mesuré est séparé en deux parties, l'une synchrone avec le champ primaire appelée partie en phase et l'autre décalée d'un quart de période dénommée partie en quadrature.

### LES PROPRIÉTÉS GÉOPHYSIQUES MESURÉES

La conductivité électrique, dans un sol, représente la capacité d'un corps à laisser passer le courant électrique. La conductivité électrique rencontrée dans les sols et les roches présente une large gamme de valeurs s'échelonnant de 0,1 à 1000 mS.m<sup>-1</sup>. Elle caractérise le déplacement des charges électriques (en majorité

[1] SCOLLAR *et al.* 1990.

[2] COLANI & AITKEN 1966 ; HOWELL 1966.

[3] PARCHAS & TABBAGH 1978.

[4] DOOLITTLE *et al.* 2014.

des ions en solution dans les matériaux qui nous intéressent). Les paramètres qui influencent la conductivité électrique d'un matériau sont la teneur en argile, la porosité, la teneur en eau, la salinité et la température. La permittivité diélectrique, dans un sol, rend compte du déplacement des ions, limité à l'échelle microscopique (sur les feuillets d'argile ou dans les pores) et des rotations des molécules polarisées (eau).

Ces deux propriétés, en l'absence de variation de température ou de salinité des sols, permettent une discrimination claire des différents ensembles sédimentaires. On pourra prendre comme exemple de structure mettant en jeu des contrastes pertinents la présence d'un lit de gravier dans des alluvions fines. Les structures archéologiques entraînent elles aussi quasi-systématiquement des modifications spatiales des deux premiers paramètres électriques évoqués précédemment et leur mesure est donc primordiale pour la cartographie des sites archéologiques.

La susceptibilité magnétique, quant à elle, représente la capacité d'un corps à s'aimanter sous l'action d'un champ magnétique externe. Elle est depuis longtemps reconnue comme étant un marqueur fort de l'anthropisation des sols. Les phénomènes de chauffe (incendie de bâtiment, zone foyère, essartage), le taux de matière organique, les activités liées au travail du fer (présence de scories ou de battitures) sont autant de facteurs qui expliquent l'augmentation de la susceptibilité magnétique. Ils ont pour point commun de modifier la teneur et la composition des oxydes et hydroxydes de fer dans le sol, favorisant la formation de grains de magnétite ou de maghémite, principaux porteurs du signal magnétique. La variabilité observée pour cette propriété marque très bien les structures de chauffe ou les structures comblées avec des matériaux issus d'un sol superficiel (fosses, fossés, etc.). Cet enrichissement en oxydes magnétiques peut également trouver son origine dans des phénomènes purement naturels. La pédogenèse elle-même induit des phénomènes d'oxydo-réduction, donc des changements de susceptibilité magnétique dont l'importance est fonction des substrats en place. En milieu sédimentaire il est probable qu'une structure comblée par des horizons de sol superficiel présente une susceptibilité magnétique plus élevée que l'encaissant. La mesure de ce paramètre présente le plus souvent un retard par rapport au champ primaire appliqué. Ce retard oblige à considérer la susceptibilité comme une grandeur complexe comprenant une composante en phase et une composante en quadrature. On parle alors de susceptibilité en quadrature ou de viscosité magnétique [6]. Elle est d'abord dépendante de la taille et du type de grains d'oxydes de fer ferrimagnétiques. Dans certains cas (grains d'oxyde de petite

taille et n'interagissant pas entre eux [7]) la viscosité magnétique est constante quelle que soit la fréquence de mesure. Ceci a été vérifié pour les sols à l'exception des sites de production de fer ou en présence de substrats volcaniques. La viscosité magnétique est forte pour les petits grains mono-domaine (10 à 30 nm), faible pour les gros grains mono-domaine (1 µm) et à nouveau forte pour les gros grains multi-domaines (10 µm et plus).

L'évaluation conjointe de la viscosité magnétique et de la susceptibilité magnétique en phase permet donc d'estimer le niveau de pédogenèse, d'identifier l'incidence d'une chauffe ou la présence d'éléments métalliques ou volcaniques par la quantité et la taille des grains magnétiques présents. Elle est donc d'une importance considérable pour les applications en archéologie.

### INTERPRÉTATION DU SIGNAL ÉLECTROMAGNÉTIQUE

À partir des équations de Maxwell il est possible de prédire et donc d'interpréter le signal électromagnétique. L'interprétation part en général de plusieurs approximations qui prennent en compte toutes les propriétés et le degré d'exactitude que l'on souhaite atteindre. Néanmoins, les caractéristiques de certains appareils ou les contextes pédologiques et géologiques peuvent rendre l'exploitation de certaines propriétés superflue [8].

Le premier critère à prendre en compte pour l'interprétation est le nombre d'induction. Il permet de considérer que l'intensité du champ secondaire en quadrature est, en première approximation, proportionnelle à la conductivité dans le cas où la conductivité électrique est inférieure à 100 mS.m<sup>-1</sup>, la fréquence d'émission inférieure à 20 kHz et l'écartement des bobines inférieur à 2 m (cas du très faible nombre d'induction). Cette approximation [9] est très utilisée en science du sol mais la solution sans approximation [10], tient compte de tous les paramètres [11] et permet la détermination de la conductivité électrique apparente dans tous les cas (milieu salé, fréquence de mesure plus élevée, grand écart entre les bobines) quelle que soit la configuration de bobines employée.

[5] TABBAGH 1986a.

[6] DABAS & SKINNER 1993 ; MC NEILL 2013.

[7] NEEL 1949.

[8] SIMON *et al.* 2020.

[9] MC NEILL 1980.

[10] WARD & HOHMANN 1988 ; HUANG *et al.* 2000.

[11] THIESSON *et al.* 2014 ; GUILLEMOTEAU *et al.* 2016.

Cette hypothèse du très faible nombre d'induction permet également de relier directement le signal électromagnétique en phase à la seule susceptibilité magnétique. Sa mesure vient compléter et préciser ce qui peut être fait avec la méthode magnétique (très largement mise en œuvre dans le cadre de l'archéologie) où les anomalies mesurées ne permettent pas de discriminer la nature de l'aimantation ni de définir précisément la profondeur des structures. Les appareils EMI permettent quant à eux d'isoler la partie induite de l'aimantation et de mieux cerner la profondeur des structures.

Pour interpréter rigoureusement le signal en phase il est cependant nécessaire d'en soustraire l'effet de la conductivité électrique [12]. Cet effet est intrinsèquement pris en compte [13], lorsque l'on détermine simultanément conductivité et susceptibilité apparentes, par l'inversion jointe ou séquentielle des signaux en phase et quadrature.

Enfin, toujours à partir de l'interprétation jointe du signal en phase et en quadrature, mais en utilisant plusieurs fréquences, il est possible de déterminer la permittivité diélectrique apparente et la viscosité magnétique apparente [14]. Ce point est important car la permittivité diélectrique ne peut être négligée

pour les plus hautes fréquences ou dans certains contextes [15] et la viscosité magnétique peut fausser considérablement l'estimation de la conductivité électrique à partir du signal en quadrature [16].

## INSTRUMENTATION

Le déploiement de ces instruments sur le terrain peut se faire de deux manières : soit un portage manuel soit un portage sur chariot ou luge (fig. 1). Le premier type de portage n'est à privilégier que pour les grands écartements car les petites variations de hauteur liées à la marche de l'utilisateur peuvent entraîner un bruit considérable sur les mesures réalisées avec de petits écartements. Ceci est particulièrement vrai pour la

[12] KLOSE *et al.* 2018.

[13] HUANG *et al.* 2000 ; GUILLEMOTEAU *et al.* 2016 ; SIMON *et al.* 2020.

[14] SIMON *et al.* 2020.

[15] BENECH *et al.* 2016b ; KESSOURI *et al.* 2015 ; SIMON *et al.* 2019.

[16] SIMON *et al.* 2015.



Figure 1

Présentation des différents systèmes d'acquisition. a. EM31-Geonics sur chariot – b. GEM2-Geophex en portage manuel – c. CMD Explorer-GF Instrument sur luge – d. GEM2-Geophex sur luge (crédit photo : Inrap).

mesure de la susceptibilité magnétique. Néanmoins l'emploi d'un chariot ou d'une luge implique soit un terrain particulièrement plat et régulier qui permet un déplacement optimal de l'appareil, soit un système, souvent lourd, qui absorbe les irrégularités du terrain mais qui nécessite alors la traction par un véhicule motorisé. Ces solutions de portage sur chariot ou luge peuvent considérablement réduire le bruit lors de l'acquisition des mesures.

Si les premiers prototypes Slingram EMI « portables », ou « à structure rigide », sont apparus dans les années 70, il existe désormais de nombreux appareils. Ces instruments peuvent être classés en trois catégories : les appareils mono-récepteur/mono-fréquence, les appareils mono-récepteur/multi-fréquences et les appareils multi-récepteurs/mono-fréquence. Il n'existe actuellement pas encore d'appareils multi-récepteurs/multi-fréquences.

L'orientation des bobines d'émission et de réception influe sur la profondeur d'investigation de l'appareil ainsi que sur sa sensibilité [17]. Les configurations les plus utilisées sont celles où les bobines sont dans un même plan (vertical ou horizontal) mais on trouve également chez certains constructeurs la configuration perpendiculaire.

Les appareils mono-récepteur/mono-fréquence ont assuré la première phase du développement dans les problématiques de très proche surface [18]. Le plus répandu est l'EM31 (Geonics Ltd) car il est particulièrement robuste et très bien adapté aux problématiques de caractérisation des formations superficielles sur les 6 premiers mètres.

Les appareils multi-écartements ou multi-configurations (CMD-Gf Instruments), DualEM-Dualem inc., EM38-MK2-Geonics Ltd) sont des appareils mono-fréquence. Ils permettent une mesure de la susceptibilité magnétique et de la conductivité électrique pour plusieurs profondeurs d'investigation.

Les appareils multi-fréquences sont tous en mode coplanaire (GEM2 Geophex, EMP400 GSSI, Nemfis Russian Academy of Sciences Siberian branch) et permettent la mesure simultanée de deux à trois des propriétés géophysiques en jeu mais ne disposent que d'un seul écartement de bobines donc qu'une seule profondeur d'investigation.

Les contraintes instrumentales qui caractérisent ces instruments ont largement limité le recours aux appareils EMI au cours des 50 dernières années. Les appareils EMI avec de grands écartements et des fréquences

relativement basses (type EM31) se sont avérés particulièrement stables et robustes mais plus adaptés à la caractérisation du contexte géologique qu'à celle des structures archéologiques. Pour la mesure du signal en phase deux problèmes doivent être pris en compte : la dérive instrumentale et la détermination du zéro instrumental.

### LA DÉRIVE INSTRUMENTALE

La dérive instrumentale résulte de déformations thermiques et mécaniques au cours de la prospection qui ont pour conséquence de faire varier le signal au cours du temps. Cette dérive instrumentale est surtout significative pour les petits écartements et sur le signal en phase. La dynamique du signal lié à la conductivité électrique est souvent plus forte que celle de la susceptibilité magnétique, le rapport signal/bruit est alors plus élevé ce qui réduit l'impact d'une éventuelle dérive. Certains appareils, comme le GEM2, possèdent une bobine auxiliaire permettant l'annulation du champ primaire ce qui limite aussi la dérive. Ce système s'avère assez efficace mais a pour conséquence d'entraîner une modification du comportement et de la sensibilité de l'appareil. Il existe des protocoles de mesure permettant de corriger ces effets de dérive [19] qui peuvent s'avérer particulièrement efficaces mais qui nécessitent un mode d'acquisition rigoureux et contraignant sur le terrain. L'usage de ce type de protocole est néanmoins à encourager.

### LA DÉTERMINATION DU ZÉRO INSTRUMENTAL (OFFSET)

Une autre caractéristique fortement contraignante pour les appareils électromagnétique basse fréquence est la détermination du zéro instrumental [20]. Les différents appareils actuellement disponibles sur le marché ont des comportements variables quant à ce zéro instrumental. En quadrature la plupart des appareils présentent une bonne stabilité de la valeur de décalage du zéro (DualEM, CMD). En phase aucun des appareils actuellement sur le marché ne présente une bonne stabilité. Pour les appareils multi-fréquences cet offset instrumental est particulièrement important et dépend de la technologie utilisée. Tout comme pour la dérive instrumentale il existe des solutions d'étalement qui permettent d'évaluer correctement ce décalage du zéro instrumental. Ces solutions peuvent s'avérer assez contraignantes et nécessitent dans certains cas le recours à des contrôles par d'autres

[17] TABBAGH 1986b.

[18] DOOLITTLE & BREVIK 2014.

[19] GRELLIER *et al.* 2013 ; DELEFORTRIE 2014.

[20] LAVOUE *et al.* 2010 ; THIESSON *et al.* 2014.

méthodes géophysiques (sondage ou panneau électrique par exemple). Néanmoins, il faut considérer l'étape d'étalonnage comme un prérequis indispensable à la mise en œuvre de cette méthode pour des mesures ayant pour but d'évaluer d'autres propriétés que la conductivité électrique, comme cela est le cas pour la prospection archéologique.

## LES PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENTS

Bien que certains travaux traitent des problèmes d'offset, de dérive ou d'acquisition, la plupart d'entre eux s'orientent autour de deux axes. Le premier concerne la mise en évidence la plus exhaustive possible des différentes propriétés géophysiques des sols influençant les mesures EMI, le second axe est orienté sur les méthodes d'inversion des données pour remonter à ces propriétés. Ces deux axes intéressent l'archéologie avec, selon les cas, une influence directe sur les dynamiques de recherche chrono-culturelles (caractérisation de la viscosité magnétique et occupation des sols par exemple).

### CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS GÉOPHYSIQUES :

#### Caractérisation des propriétés magnétiques complexes

La possibilité de s'intéresser aux propriétés magnétiques complexes des sols rend l'utilisation des appareils électromagnétiques particulièrement attractive dans le cas de l'archéologie.

La cartographie de la viscosité magnétique par l'information sur la taille des grains qu'elle fournit permet de préciser la nature des matériaux. On pourra ainsi discriminer une structure ou un sol lié à la chauffe (susceptibilité élevée, viscosité moyenne), d'un sol ayant subi une forte pédogenèse (susceptibilité moyenne, viscosité élevée), d'un substrat basaltique ou encore de particules métalliques (susceptibilité élevée, viscosité faible).

Pour déterminer les valeurs de susceptibilité magnétique complexe il

faut des fréquences basses afin que l'intensité des réponses dues à la conductivité électrique ne soit pas trop dominante. Cette détermination repose aussi sur le fait que la profondeur d'investigation associée à la conductivité électrique varie peu quelle que soit la fréquence de mesure. Cependant si on s'éloigne du très faible nombre d'induction cette assertion est de moins en moins justifiée. Cette technique a été mise en œuvre avec l'EMP400 sur le site de Lieu-Dieu (Puy-de-Dôme) [21]. Ce site a fait l'objet d'une cartographie électromagnétique en 2014 dans le but de restituer l'organisation des murs d'une villa gallo-romaine. Les cartes de susceptibilité ont permis de reconnaître de nombreuses anomalies correspondant aux murs du bâtiment antique. Les mesures de viscosité ont permis d'aller plus loin puisqu'une discrimination entre pédogenèse, structure ayant subi une chauffe (ici des terres cuites architecturales et du béton de tuileau), et roche basaltique a pu être établie (fig. 2).

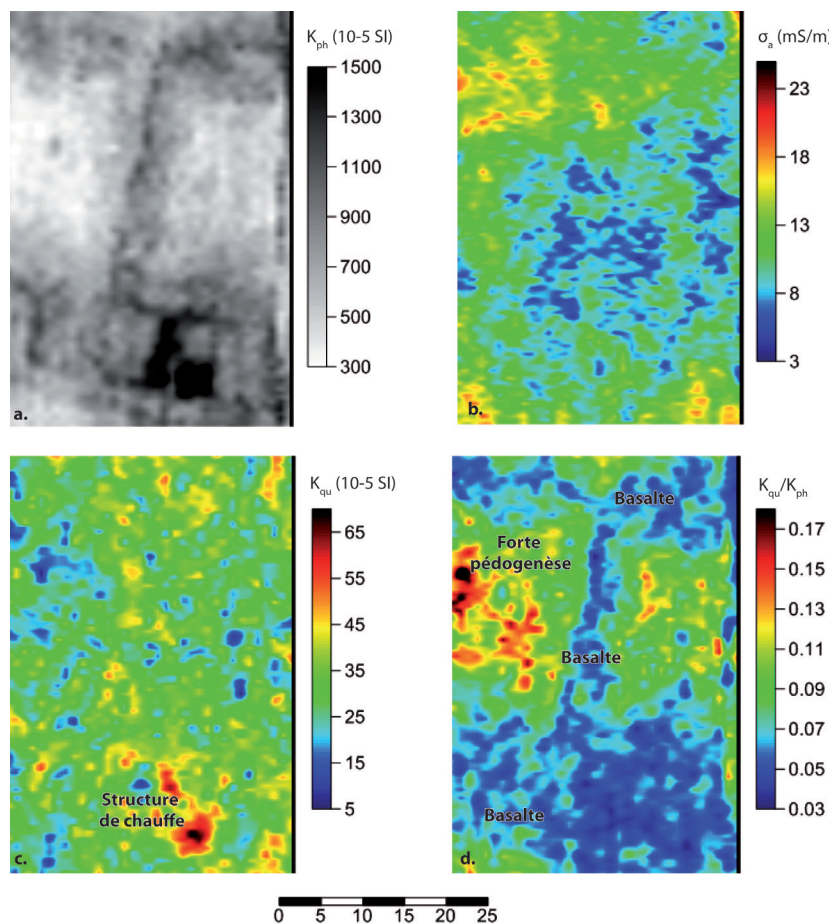


Figure 2

Cartes obtenues avec l'EMP400 en mode VCP sur le site de Lieu-Dieu (Puy-de-Dôme). **a.** Carte de susceptibilité magnétique apparente (15 kHz) – **b.** Carte de conductivité électrique apparente (15 kHz) – **c.** Carte de viscosité magnétique apparente – **d.** Carte du rapport de viscosité magnétique sur la susceptibilité magnétique, représentative de la taille des grains en jeu dans le signal magnétique.

[21] SIMON *et al.* 2015.

## Caractérisation de la permittivité diélectrique

Il a été observé pour les mesures aux plus hautes fréquences (proches de 90 kHz) et dans l'hypothèse d'un terrain homogène que la prise en compte des effets de la conductivité ne suffisait pas pour déterminer la susceptibilité magnétique à partir du signal en phase [22]. Pour des valeurs relativement élevées de la permittivité diélectrique, il existe une contribution significative de celle-ci sur le signal en phase, même si la fréquence de mesure reste peu élevée [23]. Il est, en l'état actuel des connaissances, encore difficile de préciser la gamme de valeurs pouvant être attendue pour la permittivité, mais elle s'échelonne entre 10 et 100000 et est fortement dépendante de la fréquence de mesure [24]. La cartographie de cette propriété repose actuellement sur un étalonnage de l'appareil de mesure très rigoureux avec des fréquences de mesures élevées. Actuellement seul le GEM2 permet de disposer de fréquences de cet ordre mais l'estimation de la permittivité peut être mise en défaut par les inexactitudes de l'étalonnage de l'appareil.

La figure 3 présente les résultats de la caractérisation de la conductivité électrique et de la permittivité diélectrique (à partir du signal en phase) sur le diagnostic de Marliens (Côte-d'Or), effectué en 2017 sous la responsabilité de Didier Lamotte (Inrap). Sur ce secteur les valeurs de susceptibilité magnétique sont très faibles comme cela a pu être observé aux plus basses fréquences ; la différence observée entre le signal en phase et celui en quadrature aux plus hautes fréquences peut donc trouver son origine ailleurs que dans la conductivité électrique. Il reste néanmoins à travailler sur les phénomènes à l'origine de la permittivité apparente pour pouvoir préciser à quoi sont dues les variations observées.

### MÉTHODE D'IMAGERIE (OU INVERSION DES DONNÉES)

La commercialisation des appareils multi-récepteurs a également entraîné un regain d'intérêt pour l'inversion des données électromagnétiques 1D comme 3D. Le terme d'inversion est utilisé en

géophysique lorsqu'à partir des données mesurées on cherche à retrouver un modèle de sous-sol (c'est-à-dire la géométrie des structures en place et les propriétés géophysiques du matériau qui les constitue) qui reproduit le mieux possible les données mesurées. On s'est d'abord intéressé à la conductivité électrique, plus facile à mesurer et investiguée par une communauté scientifique plus large, mais également à la susceptibilité magnétique qui, dans certains contextes (roches basaltiques, structures archéologiques), s'avère très pertinente pour la caractérisation des vestiges archéologiques voire des remplissages sédimentaires (granite, roche basaltique).

### Inversion des données électriques

La thématique de l'inversion 1D (variation selon la verticale) des données de conductivité électrique apparente dépasse largement le cadre de la prospection archéologique, puisqu'elle intéresse l'étude des sols

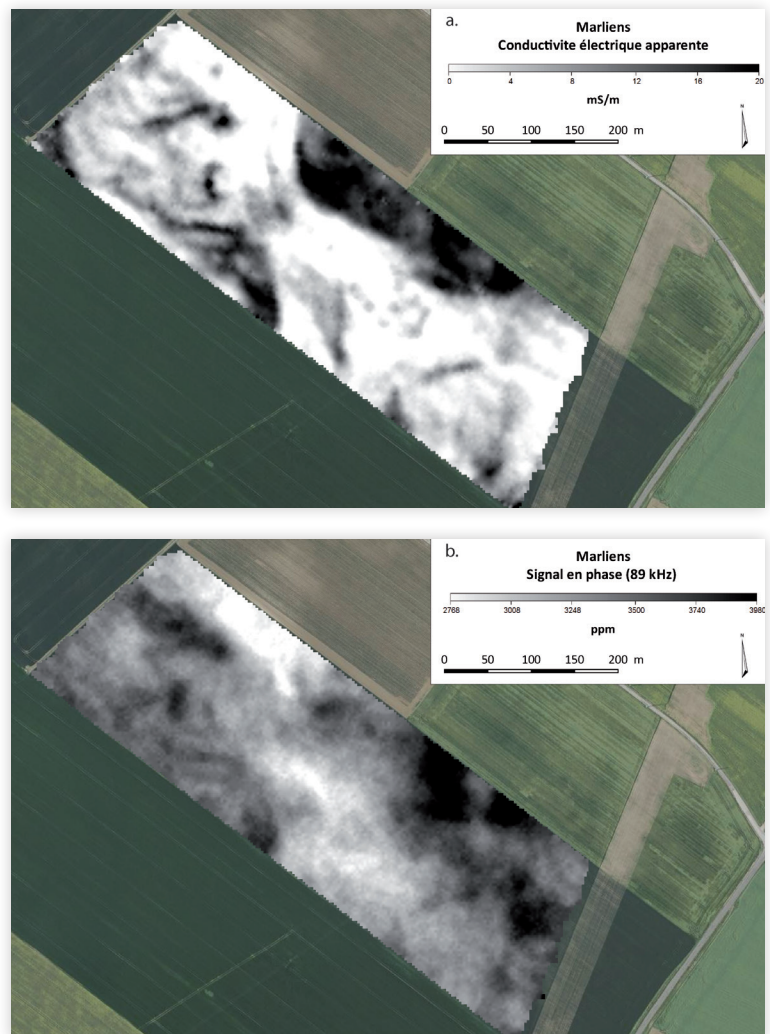


Figure 3

a. Carte de la conductivité apparente à 89 kHz GEM2 en mode HCP en mS/m – b. Carte de l'effet de la permittivité diélectrique apparente sur le signal en phase à 89 kHz GEM2 en mode HCP (en ppm).

[22] SIMON *et al.* 2019.

[23] BENECH *et al.* 2016a.

[24] KESSOURI 2012.



au sens large, où la variabilité verticale est l'une des bases de la taxonomie des sols [25]. De nombreuses équipes travaillent sur ces problèmes et proposent des solutions d'inversion [26], avec ou sans contraintes latérales. La stabilité des appareils multi-récepteurs, en ce qui concerne la conductivité électrique, permet une inversion de données sans étalonnage bien que celui-ci soit fortement recommandé, surtout dans le cas où les dynamiques de la conductivité électrique sont relativement faibles. L'inversion 1D de la conductivité électrique ne pose actuellement plus de problème majeur, plusieurs solutions ont été proposées et se sont avérées efficaces [27]. Néanmoins l'inversion 1D fait fi des effets 3D, particulièrement précieux lorsque l'on s'intéresse à des cibles archéologiques. Pour les études de sol, ce problème ne se pose pas puisque l'on peut considérer que la plus grande partie des variations latérales n'est pas trop brutale ou reste relativement localisée [28]. Pour l'archéologie le problème est plus complexe : les variations dans les trois dimensions peuvent être abruptes ; l'intérêt de l'inversion 1D est alors plus limité. Malheureusement les solutions existantes pour l'inversion 3D se caractérisent par des temps de calcul longs et ne permettent pas de traiter l'ensemble d'un jeu de données du fait des limitations en mémoire-machine. La plupart des instruments utilisés en archéologie fonctionnent dans un régime d'induction EM pour lequel la conductivité du milieu et la fréquence ont une faible influence sur la profondeur d'investigation. Dans ce cas, on peut s'appuyer sur des hypothèses simplificatrices comme l'approximation de Born où l'influence des structures 3D sur elles-mêmes est négligée [29]. Cette approximation permet d'utiliser une méthode de modélisation dans le domaine spectral qui, par son faible coût de calcul, rend l'interprétation 3D possible sur de grandes surfaces. Le modèle 3D obtenu permet de caractériser les limites géométriques des cibles avec une plus grande précision que les cartes de données apparentes et permet aussi de conforter ou d'infirmer des *a priori* sur certaines des caractéristiques des objets cartographiés [30]. Cette approche fonctionne bien pour la caractérisation de structures présentant des contrastes de conductivité relativement faibles (ex. : ondulation de l'épaisseur de sol, fondations et autres matériaux de construction), tels ceux souvent

rencontrés en archéologie. Elle reste néanmoins limitée en présence de forts contrastes positifs de conductivité électrique (ex. pour des objets métalliques).

### Inversion de données magnétiques

Les appareils multi-récepteurs permettent la cartographie simultanée à plusieurs profondeurs de la susceptibilité magnétique. Dans ce cas, l'étalonnage peut avoir un impact considérable sur les mesures et donc sur le résultat de l'inversion des données [31]. Là encore des solutions 1D et 3D existent [32]. Quelle que soit la solution envisagée, l'inversion des données de susceptibilité nécessite une estimation préalable de la conductivité électrique des sols et de sa distribution. Il faut donc avoir recours aux inversions exposées précédemment avant toute inversion de la susceptibilité magnétique. Dans certains cas, la susceptibilité magnétique s'avère être un meilleur indicateur des variations du milieu, comme cela a par exemple été le cas sur l'*oppidum* de Corent où une cuvette d'argile qui prend place dans un substrat basaltique a été cartographiée. Le substrat basaltique étant altéré, on observe un gradient progressif de la conductivité entre le comblement argileux de la cuvette et le substrat. La susceptibilité du basalte et celle de l'argile sont en revanche beaucoup plus contrastées [33]. Les mesures de susceptibilité magnétique permettent également une inversion 3D plus simple à mettre en œuvre. Des solutions qui permettent de réaliser une inversion 3D des données de susceptibilité magnétique, dite linéaire, avec des temps de calcul relativement courts ont récemment été proposées [34]. Elles permettent d'obtenir des résultats très satisfaisants avec une reconnaissance en 3D des variations de la susceptibilité magnétique. De fait ces solutions sont particulièrement adaptées aux problématiques archéologiques. Elles ont été mises en œuvre sur la villa de Lieu-Dieu [35] où l'on cherchait à cartographier le plan exact d'une villa gallo-romaine dont plusieurs bâtiments avaient été repérés par photographie aérienne. En plus de fournir une information sur la profondeur des structures dans le sol, cette solution permet également de mieux contraindre la forme et l'organisation spatiale des structures archéologiques. Il résulte de ces cartes un modèle 3D (fig. 4) possédant

[25] HENDRICKX *et al.* 2002.

[26] TRIANTAFILIS *et al.* 2013.

[27] GUERIN *et al.* 1996.

[28] GUILLEMOTEAU *et al.* 2016.

[29] GUILLEMOTEAU & TRONICKE 2016 ; GUILLEMOTEAU *et al.* 2017.

[30] BENECH *et al.* 2016b.

[31] DELEFORTRIE *et al.* 2019.

[32] GUILLEMOTEAU *et al.* 2016 ; THIESSON *et al.* 2017.

[33] GUILLEMOTEAU *et al.* 2016.

[34] THIESSON *et al.* 2017 ; GUILLEMOTEAU *et al.* 2019.

[35] GUILLEMOTEAU *et al.* 2019.

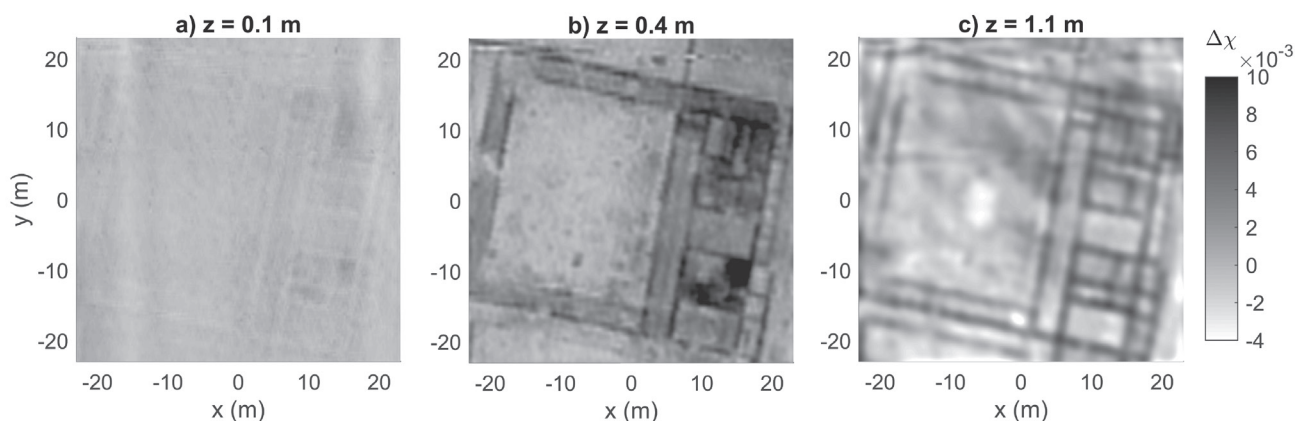


Figure 4

La méthode 3D multi-channel deconvolution (MCD) produit un modèle 3D de contrastes de susceptibilité avec une résolution latérale et verticale de 5 cm. Ici, nous montrons 3 coupes horizontales du modèle résultant à **a.** 0.1 m - **b.** 0.4 m - **c.** 1.1 m de profondeur [36].

une meilleure définition latérale que les simples cartes de propriétés apparentes pour lesquelles les anomalies montrent souvent des déformations marquées (notamment pour les configurations des bobines horizontales coplanaires et perpendiculaires), ce qui empêche une lecture optimale des objets cartographiés.

## CONCLUSION

L'effort initié dans les années 70 et confirmé par de nombreux travaux réalisés ces dernières années sur les données acquises avec les appareils électromagnétiques a permis de replacer la méthode EMI comme une méthode de choix dans la cartographie des vestiges archéologiques. Si elle permet dans la plupart des cas une cartographie moins résolue spatialement qu'avec d'autres méthodes (prospection magnétique, électrique ou radar), elle a l'avantage de permettre de couvrir rapidement de grandes surfaces et de fournir des résultats de plus en plus pertinents. Sa capacité à mesurer différentes propriétés géophysiques permet de s'affranchir des difficultés associées à certains contextes géologiques. Ses limites comme ses pratiques évoluent. Le gain de résolution spatiale et l'augmentation du rapport signal/bruit observés avec les systèmes sur chariot ou luge, ainsi que le gain de résolution apporté par les récents travaux

d'inversion 3D invitent à un changement de pratique dans la mise en œuvre de ces méthodes. Le recours aux corrections de dérives instrumentales et d'étalement doit également être généralisé, car il est le fondement *sine qua non* de tous traitements et évolution méthodologique. Les récents développements méritent désormais d'être mis en œuvre en routine. La multiplication des cas d'étude permettra sans nul doute de continuer à affiner notre compréhension de l'origine du signal électromagnétique que la multitude de facteurs impliqués rend quelques fois difficile à cerner. L'ensemble de ces avancées ne doit pas être négligé car la grande variabilité des contextes sédimentaires et archéologiques conduira à préconiser un type d'emploi et/ou d'analyse mettant en œuvre la prospection électromagnétique basse fréquence. Le développement d'une nouvelle gamme d'appareils combinant systèmes multi-fréquences et multi-récepteurs permettrait également de combiner ces différentes approches et de proposer une caractérisation des sols multidimensionnelle et multipropriétés, susceptible d'intéresser tout particulièrement la reconnaissance et la caractérisation des sites archéologiques. ■

[36] GUILLEMOTEAU *et al.* 2019.

---

## BIBLIOGRAPHIE

- BENECH, Christophe, LOMBARD, Pierre, REJIBA, Faycal & TABBAGH, Alain, 2016a**, « Demonstrating the contribution of dielectric permittivity to the in-phase EMI response of soils: example of an archaeological site in Bahrain. », *Near Surface Geophysics* 14/4, p. 337-340.
- BENECH, Christophe, DABAS, Michel, SIMON, François-Xavier, TABBAGH, Alain & THIESSON, Julien, 2016b**, « Joint interpretation of shallow EMI resistivity and magnetic (susceptibility measurements using rapid 1D/3D inversion », *Geophysics* 81/2, p. E65-E74.
- COLANI, C. & AITKEN, Martin James, 1966**, « A new type of locating device. II-Field trials », *Archaeometry* 9, p. 9-19.
- DABAS, Michel & SKINNER, John, 1993**, « Time domain magnetization of soils (VRM), experimental relationship to quadrature susceptibility », *Geophysics* 58, p. 326-333.
- DELEFORTRIE, Samuel, DE SMEDT, Philippe, SAEY, Timoty, VAN DE VIJVER, Elen & VAN MEIRVENNE, Marc, 2014**, « An efficient calibration procedure for correction of drift in EMI survey data », *Journal of Applied Geophysics* 110, p. 115-125.
- DELEFORTRIE, Samuel, HANSSENS, Daan, SAEY, Timoty, VAN DE VIJVER, Elen, SMETRYNS, Marte, BOBE, Christin & DE SMEDT, Philippe, 2019**, « Validating land-based FDEM data and derived conductivity maps; Assessment of signal calibration, signal attenuation and the impact of heterogeneity », *Journal of Applied Geophysics* 164, p. 179-190.
- DOOLITTLE, James A. & BREVIK, Erik, 2014**, « The use of electromagnetic induction techniques in soils studies », *Geoderma* 223-225, p. 33-45.
- GRELLIER, Séraphine, FLORSCH, Nicolas, CAMERLYNCK, Christian, JANEAU, Jean-Louis, PODWOJEWSKI, Pascal & LORENTZ, Simon A., 2013**, « The use of Slingram EM38 data for topsoil and subsoil geoelectrical characterization with a Bayesian inversion », *Geoderma*, 200, p. 140-155.
- LAVOUÉ, François, VAN DER KRUK, Jan, RINGS, J., ANDRÉ, F., MOGHADAS, Davood, HUISMAN, Johan Alexander, LAMBOT, Sébastien, WEIHERMÜLLER, Lutz, VANDERBORGHT, Jan, & VERECKEN, Harry, 2010**, « Electromagnetic induction calibration using electrical conductivity modeling based on electrical resistivity tomography », *Near Surface Geophysics* 8, p. 3- 11.
- GUERIN, Roger, MEHENI, Youcef, RAKOTONDROSOA, Gérard & TABBAGH Alain, 1996**, « Interpretation of Slingram conductivity mapping in near-surface geophysics: using a single parameter fitting with 1D model », *Geophysical Prospecting* 44, p. 233-249.
- GUILLEMOTEAU, Julien, SIMON, François-Xavier, LUCK, Erika & TRONICKE, Jens, 2016**, « 1D sequential inversion of portable multi-configuration electromagnetic induction data », *Near Surface Geophysics* 14, p. 411-420.
- GUILLEMOTEAU, Julien & TRONICKE, Jens, 2016**, « Evaluation of a rapid hybrid spectral-spatial domain 3D forward-modeling approach for loop-loop electromagnetic induction quadrature data acquired in low-induction-number environments », *Geophysics* 81/6, p. E447-E458.
- GUILLEMOTEAU, Julien, CHRISTENSEN, Niels Boie, JACOBSEN, Bo Holm & TRONICKE, Jens, 2017**, « Fast 3D multichannel deconvolution of electromagnetic induction loop-loop apparent conductivity data sets acquired at low induction numbers », *Geophysics* 82/6, p. E357-E369.
- GUILLEMOTEAU, Julien, SIMON, François-Xavier, HULIN, Guillaume, DOUSTEYSSIER, Bertrand, DACKO, Marion & TRONICKE, Jens, 2019**, « 3-D imaging of subsurface magnetic permeability/susceptibility with portable frequency domain electromagnetic sensors for near surface exploration », *Geophysical Journal International* 219/3, p. 1773-1785.
- HENDRICKX, Jan M.H., BORCHERS, Brian, CORWIN, Dennis L., LESCH, Scott M., HILGENDORF, Alex C., SCHLUE, J., 2002**, « Inversion of Soil Conductivity Profiles from Electromagnetic Induction Measurements: Theory and Experimental Verification », *Soil Science Society of America Journal* 66, p. 673-685.
- HOWELL, Mark, 1966**, « A soil conductivity meter », *Achaeometry* 9, p. 20-23.
- HUANG, Hoaping, WON, I.J., 2000**, « Conductivity and susceptibility mapping using broadband electromagnetic sensors », *Journal of Environmental & Engineering Geophysics* 5/4, p. 31-41.
- KESSOURI, Pauline, 2012**, « Mesure simultanée aux fréquences moyennes et cartographie de la permittivité diélectrique et de la conductivité électrique du sol », Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6.
- KESSOURI, Pauline, FLAGEUL, Sébastien, VITALE, Quentin, BUVAT, Solène, REJIBA, Fayçal & TABBAGH, Alain, 2016**, « Medium-frequency electromagnetic device to measure electric conductivity and dielectric permittivity of soils », *Geophysics* 81/1, p. IJF-Z7.
- KLOSE, Tim, GUILLEMOTEAU, Julien, SIMON, François-Xavier & TRONICKE, Jens, 2018**, « Toward subsurface magnetic permeability imaging with electromagnetic induction sensors: Sensitivity computation and reconstruction of measured data », *Geophysics* 83/5, p. E335-E345.
- MCNEILL, John Duncan, 1980**, « Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers », *Geonics Limited*, TN-6.

- MCNEILL, John Duncan, 2013**, « The magnetic susceptibility of soils is definitely complex ». *Geonics Limited Technical Note* TN-36.
- NEEL, Louis, 1949**, « Théorie du traînage magnétique des ferromagnétiques en grains fins avec application aux terres cuites », *Annales de géophysique* 5, p. 99-136.
- SCOLLAR, Irwin, TABBAGH, Alain, HESSE, Albert & HERZOG, Irmela, 1990**, *Archaeological prospecting and remote sensing*, Cambridge – New York – Port Chester, 674 p.
- SIMON, François-Xavier, SARRIS, Apostolos, THIESSON, Julien & TABBAGH, Alain, 2015**, « Mapping of quadrature magnetic susceptibility/magnetic viscosity of soils by using multi-frequency EMI », *Journal of Applied Geophysics* 120, p. 36-47.
- SIMON, François-Xavier, TABBAGH, Alain, DONATI, Jamieson & SARRIS, Apostolos, 2019**, « Permittivity mapping in the VLF-LF range using a multi-frequency EMI device: first tests in archaeological prospecting », *Near Surface Geophysics* 17/1, p. 27-41.
- SIMON, François-Xavier, PAREILH-PEYROUX, Mathias, BUVAT, Solène, MAYORAL, Alfredo, LABAZUY, Philippe, KELFOUN, Karim & TABBAGH, Alain, 2020**, « Quantifying multiple electromagnetic properties in EMI surveys: a case study of hydromorphic soils in a volcanic context – the Lac du Puy (France) », *Geoderma* 361, 114084.
- TABBAGH, Alain, 1986a**, « Applications and advantages of the Slingram electromagnetic method for archaeological prospecting », *Geophysics* 51/3, p. 576-584.
- TABBAGH, Alain, 1986b**, « What is the best coil orientation in the Slingram electromagnetic prospecting method? », *Archaeometry* 28/2, p. 185-196.
- THIESSON, Julien, KESSOURI, Pauline, SCHAMPER, Cyril & TABBAGH, Alain, 2014**, « Calibration of frequency-domain electromagnetic devices used in near-surface surveying », *Near Surface Geophysics* 12, p. 481-491.
- THIESSON, Julien, TABBAGH, Alain, SIMON, François-Xavier & DABAS, Michel, 2017**, « 3D linear inversion of magnetic susceptibility data acquired by frequency domain EMI », *Journal of Applied Geophysics* 136, p. 165-177.
- TITE, Michael & MULLINS, Christopher, 1970**, « Electromagnetic prospecting on archaeological sites using a soil conductivity meter », *Archaeometry* 12, p. 97-104.
- TRIANTAFILIS, John, MONTEIRO SANTOS, Fernando A., 2013**, « Electromagnetic conductivity imaging (EMCI) of soil using a DUALEM-421 and inversion modelling software (EM4Soil) », *Geoderma* 211-212, p. 28-38.
- WARD, Stanley H. & HOHMANN, Gerald W., 1988**, « Electromagnetic theory for geophysical applications », dans Misac N. Nabighian & John D. Corbett (éd.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Volume 1, *Theory*, Tulsa, Oklahoma, p. 130-311.