

MAGNETOMETRES VECTORIELS FLUXGATE : POSSIBILITES DE MESURE ET D'INTERPRETATION AU SOL, EN DRONE ET AEROPORTEES POUR L'ETUDE DU SOUS-SOL

GAVAZZI B.¹, LE MAIRE P.^{1,2}, MERCIER DE LEPINAY J.¹, CALOU P.^{1,3}, MUNSCHY M.¹

¹ Institut de Physique du Globe de Strasbourg, Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, Université de Strasbourg et CNRS (IPGS UMR 7516), Strasbourg, France. bgavazzi@unistra.fr

² CARDEM/EUROVIA, Bischheim, France.

³ ECA-EN, Groupe ECA, Coueron, France.

RÉSUMÉ

En géophysique appliquée les méthodes magnétiques sont aujourd'hui utilisées principalement pour deux types de mesure : au sol à l'aide de gradiomètres pour de l'imagerie de proche surface (archéologie, BTP, dépollution) ou aéroportées à l'aide de magnétomètres scalaires et d'unités de compensation pour l'étude à plus large échelle (exploration de ressources). Les dernières avancées en mesure et interprétation à l'aide de magnétomètres vectoriels fluxgate permettent de mettre au point des systèmes de mesure au sol, en drone et aéroportés plus précis et/ou moins coûteux que les standards actuels et d'offrir une échelle continue de niveaux de mesure du sol à l'aérien et ainsi d'élargir les potentiels applicatifs pour l'étude du sous-sol. Différentes applications et comparaisons avec les standards actuels sont illustrés par des études de cas en archéologie, en BTP et en exploration pour la géothermie.

Mots clés : Magnétisme, fluxgate, archéologie, BTP, géothermie.

ABSTRACT

FLUXGATE VECTOR MAGNETOMETERS: POSSIBILITIES OF MEASUREMENT AND INTERPRETATION FOR GROUND, UAV AND AIRBORNE SURVEYS FOR THE STUDY OF THE UNDERGROUND

In applied geophysics magnetic methods are currently used mainly for two type of measurements: on the ground with gradiometers for imaging the subsurface (archaeology, building and public works) or airborne with scalar magnetometers and compensation units for studies at a larger scale (resource exploration). Latest advances in measurement and interpretation with fluxgate vector magnetometers allow the conception of measuring devices usable on ground, on UAV or airborne with better precision and/or cost reduction compared to current standards. This also offers a continuous scale of measurement levels from ground to airborne and therefore increases the potential of application of the

method. Different applications and comparisons with current standards are presented through case studies in archaeology, public works and geothermal exploration.

Key words: *Magnetism, fluxgate, archaeology, buildings and public work, geothermal exploration.*

.1 INTRODUCTION

Les méthodes géomagnétiques sont aujourd'hui utilisées pour un très large panel d'applications à la fois dans les milieux académiques et industriels : archéologie, études environnementales, BTP, exploration de ressources... Au sol, les études consistent généralement à produire des cartes à l'aide de gradiomètres verticaux et d'en interpréter directement les hétérogénéités du sous-sol. Il s'agit d'ailleurs de la méthode géophysique la plus répandue pour les études archéologiques ou la dépollution pyrotechnique. Pour les mesures aéroportées des magnétomètres scalaires sont utilisés en combinaison avec des systèmes de compensation des aimantations du porteur en temps réel. Ce type de mesure est réservé à des études de grande envergure pour des questions de coût et de logistique. Afin de dépasser les limites de chacun de ces milieux l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS) conduit des recherches à la fois sur la mesure, le traitement et l'interprétation des données magnétiques. Les résultats ont ainsi permis de mettre au point un système de mesure multi-échelle à l'aide de magnétomètres fluxgate à trois composante. L'objet de cette présentation est de présenter comment les magnétomètres fluxgate et les outils interprétatifs issus des méthodes potentielles permettent d'obtenir des résultats plus précis et/ou moins coûteux que les systèmes actuels ainsi que d'offrir de nouvelles échelles de mesure à travers différents cas d'étude.

.2 MATÉRIEL : FLUXGATE ET SYSTEME DE MESURE IPGS

Les magnétomètres fluxgates mesurent l'intensité du champ magnétique dans trois directions orthogonales, c'est-à-dire trois composantes. Ces magnétomètres sont robustes, peu coûteux et consomment peu mais ce sont des instruments relatifs qui nécessitent d'être étalonnés. En effet, on note trois types d'erreur sur chacun des trois senseurs d'un magnétomètre : l'offset, la sensibilité et la non-orthogonalité. MUNSCHY et al. (2007) démontre que les paramètres de correction de ces erreurs peuvent être inversés à partir d'un processus simple : on fait varier l'attitude du capteur dans une zone où le champ peut être considéré constant. Les variations enregistrées sont alors liées seulement aux erreurs du magnétomètre ainsi qu'aux effets des aimantations de l'équipement. L'application des correctifs obtenus permet ainsi d'étalonner les capteurs et de compenser les aimantations de l'équipement sans requérir à une unité de compensation en temps réel. L'IPGS a mis au point un système de mesure mono et multi-capteurs pouvant être montés sur tout type de porteur (GAVAZZI et al.,

2016). La procédure d'étalonnage et de compensation permet d'obtenir des données exploitables en géophysique appliquée et d'une précision similaire quel que soit le porteur (**Fig. 1**).

Système de mesure	Ecart-type avant correction	Ecart-type avant correction
 Magnétomètre	21	0.3
 Sac à dos	97	0.7
 Drone (DJI Matrice 100)	54	1
 Avion (Maule MX7)	102	1.9

Fig. 1 - Ecart-type des mesures avant et après corrections des paramètres inversés lors d'une procédure d'étalonnage et de compensation pour un magnétomètre seul (Bartington MAG03), système sur sac à dos, un drone et un avion.

.3 CAS D'ETUDE

3.1. Au sol : haute résolution en archéologie

Le cas d'étude présente une partie des résultats de l'étude du site de Qasr 'Allam dans l'oasis de Bahariya du désert occidental égyptien obtenus à l'aide du système de l'IPGS monté sur un sac à dos et qui ont permis de découvrir et protéger un ensemble culturel invisible en surface (GAVAZZI et al., 2017). Les résultats sont comparés aux résultats acquis sur la même zone par Institute of Archaeology and Ethnology de l'académie des sciences polonaise à l'aide d'un

gradiomètre très commun en archéologie et en BTP (Geoscan FM 256). La comparaison montre que les mêmes interprétations de canaux d'irrigation peuvent être fait sur les deux jeux de données. Néanmoins les anomalies de large longueur d'onde ne sont pas visibles sur la gradiométrie et l'utilisation de transformées des méthodes potentielles induit plus d'imprécisions que sur la mesure de l'IPGS. De plus, la mesure multi-capteurs de l'IPGS est dix fois plus rapide que l'acquisition au gradiomètre.

3.2. Mesures au sol et en drone pour la dépollution pyrotechnique

La mesure magnétique est aujourd'hui indispensable pour la dépollution pyrotechnique. Les mesures au sol ou en drone sur la BA112 ont permis de mettre au jour de potentielles munitions ainsi que des tranchées, des réseaux et d'anciennes fondations. L'utilisation de la mesure du champ total permet d'inverser position horizontale, profondeur et aimantation des munitions à partir du signal analytique. La méthode connaît néanmoins certaines limites lorsque la géométrie est complexe.

3.3. Mesures en drone pour l'étude lithologique et structurale à haute résolution

A travers deux exemples dans des contextes d'exploration pour des projets de géothermie profonde en France et à St-Christophe-et-Niéves des mesures à différentes altitudes en drone et en avion avec le système de l'IPGS sont comparées. Ainsi, la mesure à 25 m du sol révèle des informations plus détaillées sur le sous-sol qu'un levé plus traditionnel à 100 m. La comparaison entre un levé en avion avec le système de l'IPGS et un levé industriel en hélicoptère montre une qualité similaire entre les deux dispositifs (**Fig. 2**) pour un coût 20 à 50 fois moins important pour le système à base de fluxgate.

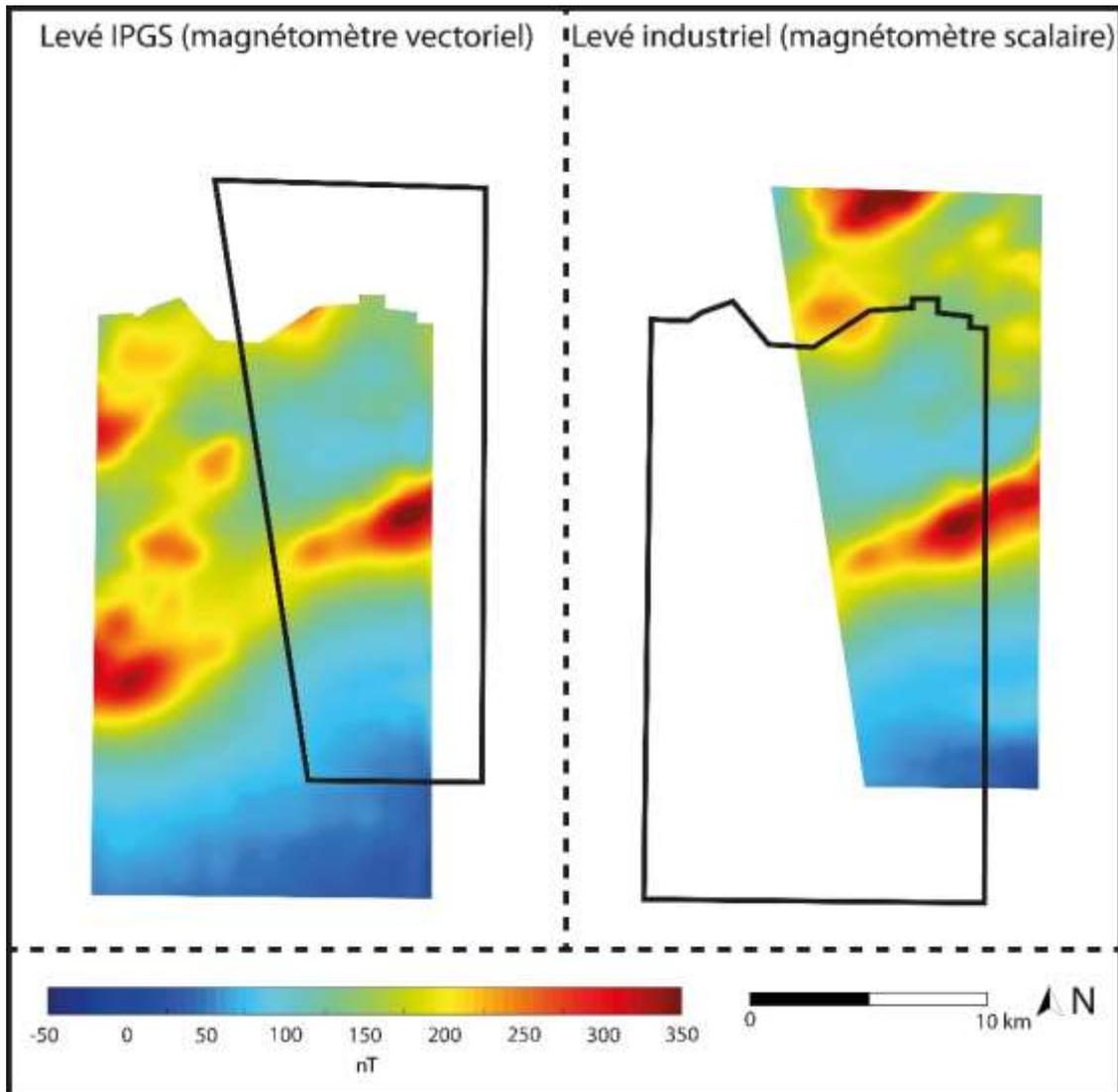


Fig. 2 - Comparaison entre les résultats d'un levé en avion (Maule MX7) réalisé par l'IPGS à l'aide de son propre système à base de fluxgate 3-composantes (Bartington MAG03) et d'un levé industriel en hélicoptère (Ecureuil AS 350) réalisé par Geophysics GPR International Inc. à l'aide d'un système à base de magnétomètre scalaire au césium (Geometrics) et d'un système de compensation (RMS Instruments).

.4 CONCLUSION

Les magnétomètres vectoriels peuvent être une bonne alternative aux systèmes existants en géophysique appliquée. En aéromagnétisme ils permettent d'obtenir des résultats similaires aux standards industriels à une fraction de leur coût. Au sol, ils permettent d'obtenir des résultats plus sensibles que ceux des gradiomètres et sont moins soumis aux imprécisions lors de l'utilisation de transformées des méthodes potentielles, le tout en étant la plupart du temps plus

rapide. De plus, ils permettent de faire de l'acquisition en drone, ce qui comble le saut d'échelle entre le sol et l'aérien et ouvre ainsi tout un nouveau champ de potentiels applicatifs.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

GAVAZZI B., ALKHATIB-ALKONTAR R., MUNSCHY M., COLIN F., DUVETTE C., 2017 – On the Use of Fluxgate 3-Axis Magnetometers in Archaeology: Application with a Multi-sensor Device on the Site of Qasr ‘Allam in the Western Desert of Egypt. *Archaeol. Proscpect.*, 24(1), 59-73. doi: 10.1002/arp.1553.

GAVAZZI B., LE MAIRE P., MUNSCHY M., DECHAMP A., 2016 – Fluxgate vector magnetometers: A multisensor device for ground, UAV, and airborne magnetic surveys. *The Lead. Edge*, 35(9), 765-797. doi: 10.1190/tle35090795.1.

MUNSCHY M., BOULANGER D., ULRICH P., BOUIFLANE M., 2007 – Magnetic mapping for the detection and characterization of UXO: Use of multi-sensor fluxgate 3-axis magnetometers and methods of interpretation. *J. of Appl. Geophys.*, 61, 168-183. doi: 10.1016/j.jappgeo.2006.06.004.