

# La mesure magnétique en drone : un nouveau moyen pour cartographier à des résolutions jusque-là inaccessibles

## Magnetic survey with UAV to fill the gap between ground and airborne magnetic surveying

*Pauline LE MAIRE*<sup>1,2\*</sup>, *Marc MUNSCHY*<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CARDEM, France

<sup>2</sup>SOPRECO, France

<sup>3</sup>ITES (Institut Terre et Environnement, Strasbourg), France

**Résumé** La méthode magnétique permet d'imager les contrastes d'aimantation de dimension centimétrique à kilométrique dans le sous-sol. Pour la bonne caractérisation de ces contrastes, il est nécessaire d'avoir une résolution suffisante (espacement entre les profils et distance entre la source et le capteur). Jusqu'à peu, les méthodes de cartographie magnétique au sol ou aéroportée ne permettaient pas l'acquisition de données dans certaines zones (Terrains accidentés, champs en culture, ...). Dans ce document, nous présentons des solutions pour réaliser la mesure magnétique en drone via l'utilisation de fluxgate. La compensation du moment magnétique du drone est faite par la méthode de la calibration scalaire. Deux exemples d'applications sont présentés, l'un portant sur une campagne d'acquisition multi-échelle pour la caractérisation géologique locale. Le second porte sur de la mesure magnétique à 4 capteurs en drone et au sol.

**Abstract** The magnetic method allows to image the magnetization contrasts (centimetric to kilometeric dimensions). However, for the good characterization of these contrasts, it is necessary to have a sufficient resolution during the survey (spacing between profiles and distance between the source and the sensor). In various ground magnetic mapping projects, it is often impossible to perform measurements for practical reasons: presence of vegetation, streams or bodies of water, steep slopes, houses, fences, etc. Magnetic measurements with an unmanned aerial vehicle (UAV) are ideal for filling the gap between ground and airborne magnetic surveying. In this

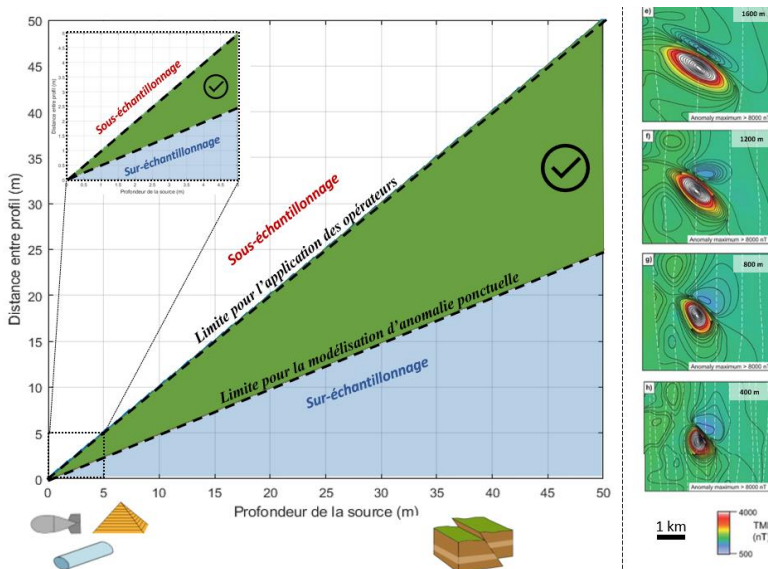
---

\* Corresponding author: [pauline.le-maire@cardem.fr](mailto:pauline.le-maire@cardem.fr)

paper, we present solutions for magnetic measurement by UAV with fluxgate. Two examples are presented, one concerning a multi-scale magnetic survey (100 m, 30 m and 1 m) for local geological characterization. The second one is high-resolution magnetic survey with ground system and UAV with 4 magnetic sensors.

## 1 Introduction

La connaissance du sous-sol est un des éléments clés pour la réussite de projet, quelle que soit la dimension des objets étudiés (exploration géologique pour la géothermie, la mine, ...) ou la localisation d'objets anthropiques (réseaux, munitions enfouies, ...). Parmi les différentes méthodes géophysiques, la méthode magnétique permet d'imager des objets de tailles centimétriques à kilométriques en étudiant les variations de l'intensité du champ magnétique mesurées lors de campagne de prospection. L'avantage de cette méthode est qu'elle est passive et elle ne va pas être limitée pour ce qui est de la profondeur d'investigation. Les limites sont en lien avec l'amplitude des contrastes d'aimantation ainsi que leurs profondeurs. A. Reid (1980) a donné les bons paramètres d'acquisitions d'une campagne magnétique en fonction de l'objectif et du type de capteurs utilisés (gradiométrie, champ total). Ainsi, pour cartographier des anomalies et effectuer des transformées, il est nécessaire que l'espacement entre les profils soit inférieur à la distance entre le capteur et la source. De plus, si l'on souhaite faire des modélisations d'anomalie ponctuelle, il est préconisé que l'espacement soit égal à la moitié de la distance entre la source et le capteur (Fig 1).



**Fig. 1.** Schéma construit à partir des éléments de l'étude de Reid (1980) montrant l'espacement entre profil en fonction de la profondeur de la source, dans le cadre de la mesure de l'intensité du champ magnétique. A droite, un exemple de résultat de campagne magnétique obtenu pour différents espacements de profils [2-3].

Dans certains cas, les solutions traditionnelles d'acquisition au sol ou en aérien ne permettent pas d'obtenir une résolution suffisante pour bien caractériser magnétiquement une source. Cependant, depuis une dizaine d'année, la technologie des drones s'est fortement développée et démocratisée permettant une meilleure fiabilité de ces engins, une facilité accrue dans le pilotage et une diminution du prix d'achat. Ainsi, ce nouveau vecteur permet l'acquisition de données dans des zones difficilement accessibles pour une prospection géophysique au sol (zone en culture, terrain accidenté, ...), où les solutions aéromagnétiques sont inadaptées et de trop faible résolution par rapport à l'objet que l'on souhaite cartographier. Les premières intégrations de capteurs magnétiques sur des drones ont été réalisées dans le cadre de démonstrateur pour la prospection minière avec l'utilisation de capteur magnétique absolu [4-6]. Dans cette étude, nous allons vous présenter les différentes solutions que nous avons développées en partenariat avec l'ITES : intégration de capteur, compensation de l'effet magnétique du drone et élaboration de plusieurs démonstrateurs.

## **2 Méthode**

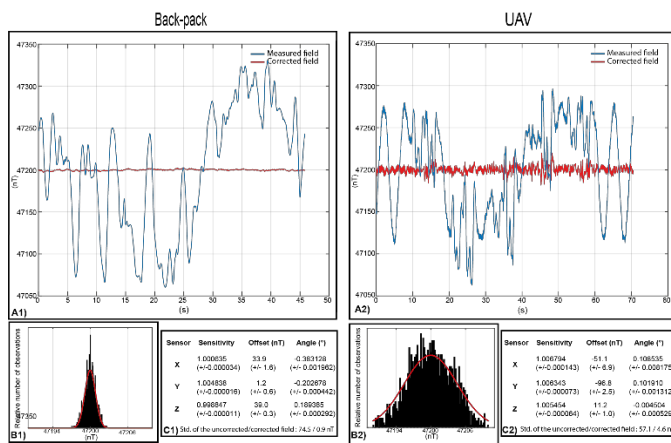
### **2.1 Equipements**

Les capteurs magnétiques utilisés sont des capteurs magnétiques vectoriels de type fluxgate trois composantes (Bartington MAG03 et/ou Sensys). Ils sont légers et mesurent de façon relative le vecteur champ magnétique en un point. En fonction des acquisitions souhaitées, il est nécessaire d'utiliser un certain type de matériel. Pour répondre à cette problématique nous avons travaillé avec l'ITES pour développer ces différentes électroniques. Elles permettent l'enregistrement des mesures magnétiques de 1 à 8 capteurs à des fréquences allant de 1 à 300 Hz et la géolocalisation de celles-ci via l'utilisation d'antenne GNSS ou D-GNSS.

Pour les acquisitions au sol, le système est placé sur un support de type sac-à-dos. Quatre à huit capteurs sont fixés à un intervalle de 50 cm dans une perche à l'avant du support. Pour l'acquisition en drone, l'électronique est placée sur un drone (M210 RTK(DJI), M300 RTK(DJI), P4 RTK (DJI), ...). En fonction de l'objectif de l'étude, différentes intégrations peuvent être réalisées avec 4 ou 1 capteur, les montages seront précisés dans la section exemple.

### **2.2 Calibration scalaire et traitements**

Les mesures étant faites avec des capteurs relatifs de type fluxgate, il faut donc effectuer une correction des mesures, c'est-à-dire étalonner les capteurs. Pour ce faire, en début et fin d'acquisition, l'opérateur fait varier au maximum l'attitude du/des capteurs dans une zone où l'intensité du champ magnétique est constante. Cette procédure permet également de compenser le moment magnétique inhérent au support tels que les connectiques, les moteurs, les batteries... Sur la figure 2, on présente les résultats du calcul des neuf paramètres permettant l'étalonnage et la compensation de l'ensemble des données, le nom de cette procédure est la calibration scalaire [7-8].



**Fig. 2.** Résultat de l'étalonnage au sol (à gauche) et en l'air (à droite). La courbe bleue donne l'intensité du champ magnétique avant étalonnage et celle en rouge après inversion des données. L'écart-type avant étalonnage est de 74,5 nT et après étalonnage de 0,9 nT pour les mesures au sol. Il est de 57,1 nT avant étalonnage et de 4,6 nT après étalonnage pour les mesures en drone.

Les cartes de l'intensité de l'anomalie magnétique sont calculées en utilisant les données étalonnées et en respectant les procédures de traitement habituellement utilisées en magnétisme.

## 3 Exemples

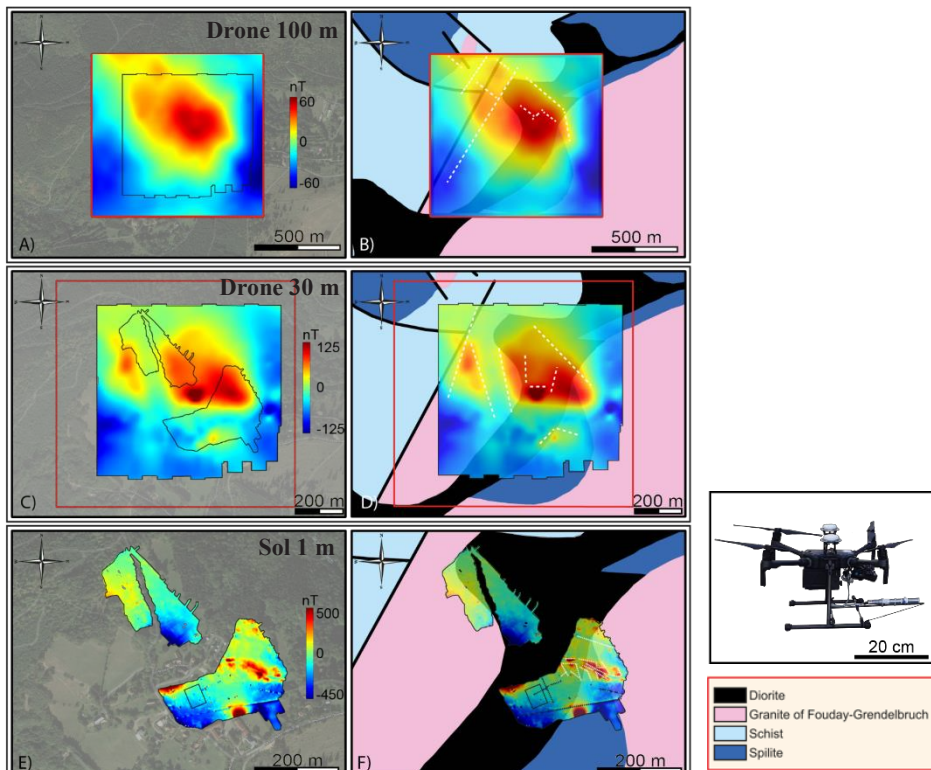
### 3.1 Géologie

Le premier exemple porte sur un démonstrateur réalisé en 2018 sur un site localisé en Alsace dans une zone semi-montagneuse. Pour ce faire, des campagnes d'acquisition avaient été réalisées à la fois au sol dans les zones accessibles et en drone à différentes hauteurs (100 m, 30m, 1 m) [9]. Pour les acquisitions aériennes, un fluxgate a été monté à 42 cm à l'avant d'un drone M210 RTK (Fig 3). La figure ci-dessous présente les résultats obtenus pour trois campagnes d'acquisition, deux réalisées en drone à 100 et 30 m au-dessus du sol et une avec un système sol. La compensation de l'effet magnétique pour le drone et le système sol a été élaborée via l'application de la calibration scalaire.

La synthèse des cartes magnétiques acquises dans la zone à différentes hauteurs (300 m (issue d'une campagne hélicoptère précédente) – 100 m, 30 m et 1 m) montre différentes anomalies magnétiques (amplitude, forme, longueur d'onde et orientation).

Le levé à 100 m est cohérent avec levé hélicoptère à 300 m, avec une anomalie magnétique orientée NO-SE. On observe des structures secondaires orientées NO-SE et ENE-OSO, qui correspondent aux données des affleurements géologiques, ainsi qu'à la faille NO-SE entre le granite et l'unité métamorphique. La carte magnétique à 30 m montre une anomalie E-O avec une nouvelle segmentation qui est orientée N-S. La carte magnétique réalisée au sol présente une forte anomalie orientée E-O, mais aucun indice n'est visible sur le terrain pour

aider l'identification de la source. Une explication possible serait la présence d'un dyke recoupant le granite, comme cela est documenté dans d'autres parties du massif magmatique [10].



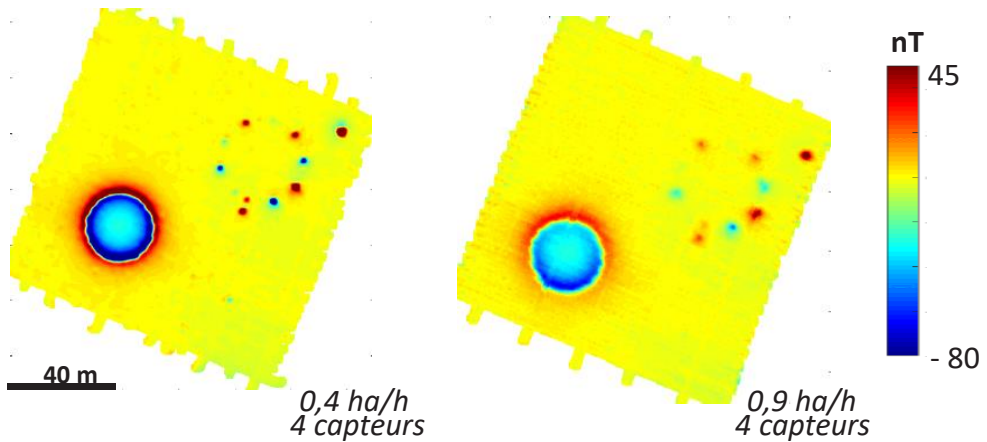
**Fig. 3.** A) Carte de l'intensité de l'anomalie magnétique après réduction au pôle ( $I=64.2^\circ$  et  $D=1.6^\circ$ ) à 100 m au-dessus du sol superposé à une image satellite. B) Carte de l'intensité de l'anomalie magnétique après réduction au pôle ( $I=64.2^\circ$  et  $D=1.6^\circ$ ) à 100 m au-dessus du sol superposé à la carte géologique C) Carte de l'intensité de l'anomalie magnétique après réduction au pôle ( $I=64.2^\circ$  et  $D=1.6^\circ$ ) à 30 m au-dessus du sol superposé à une image satellite. D) Carte de l'intensité de l'anomalie magnétique après réduction au pôle ( $I=64.2^\circ$  et  $D=1.6^\circ$ ) à 30 m au-dessus du sol superposé à la carte géologique E) Carte de l'intensité de l'anomalie magnétique après réduction au pôle ( $I=64.2^\circ$  et  $D=1.6^\circ$ ) à 1 m au-dessus du sol superposé à une image satellite. F) Carte de l'intensité de l'anomalie magnétique après réduction au pôle ( $I=64.2^\circ$  et  $D=1.6^\circ$ ) à 1 m au-dessus du sol superposé à la carte géologique. Les interprétations structurales sont en trait blanc pointillé. A droite, le M210 RTK équipé de l'électronique et du capteur magnétique.

### 3.2 Anthropique

Le second démonstrateur a été réalisé en 2019 dans la plaine d'Alsace, dans un champ agricole. Sur le terrain, des sources magnétiques avaient été placées au sol. La première source était un câble électrique alimenté disposé en forme de cercle d'environ 30 m de diamètre (cercle au SO Fig.4.). La seconde source a été construite avec une dizaine de câbles

métalliques disposés en forme de cercle (cercle au NE Fig.4.). Deux campagnes d'acquisitions ont été réalisées, une au sol avec un système constitué de 4 capteurs magnétiques et une en drone avec également 4 capteurs. Pour les deux campagnes, l'espacement entre les capteurs était de 50 cm. La compensation du moment magnétique (induit et rémanent) des supports a été également faite par des calibrations scalaires. Le vol drone a été réalisé en pilotage automatique.

La figure suivante présente les cartes de l'intensité de l'anomalie magnétique. Les amplitudes sont plus faibles dans le levé effectué en drone car la distance sol-capteur était de 2 m. Des travaux sont en cours pour la modélisation et la caractérisation des aimantations des sources placées sur le terrain.



**Fig. 4.** Cartes de l'intensité de l'anomalie magnétique acquise avec le système sol à gauche et en drone à droite.

D'un point de vue opérationnel, le temps d'acquisition en drone est environ deux fois plus rapide que l'acquisition traditionnelle au sol.

## 4 Conclusion et perspectives

Les développements entrepris ont permis la création de nouvelles solutions drones permettant l'acquisition de données avec 1 ou 4 capteurs magnétiques. Une compensation scalaire a permis de supprimer l'effet magnétique du porteur et les données obtenues sont cohérentes aux cartographies magnétiques réalisées par les moyens conventionnels (acquisitions hélicoptérée et sol). Ainsi ces nouvelles solutions vont permettre l'acquisition de données magnétiques à des résolutions adaptées encore jusque-là inaccessible via l'utilisation de solution traditionnelle. Un système est en cours de tests pour permettre de voler de façon drapée à 1 m du sol. Ce nouveau système devrait permettre d'obtenir des meilleurs résultats encore plus proches des données acquises au sol.

## Références

1. A.B. Reid, *Geophysics*, **45**, 973-976 (1980)
2. M. Dentith, S.T. Mudge, *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*, (2014)
3. W.B. Agocs, *Geophysics*, **20**, 871-885 (1955)
4. A. Malehmir, L. Dynesius, K. Paulusson, A. Paulusson, H. Johansson, M. Bastani, M. Wedmark, P. Marsden, *The Leading Edge*, **36**, 552–557 (2017)
5. M. Cunningham, C. Samson, A. Wood, I. Cook, I., *Pure and Applied Geophysics*, **175**, 3145–3158 (2018)
6. K. Parvar, A. Braun, D. Layton-Matthews, M. Burns, *Journal of Unmanned Vehicle Systems* (2017)
7. N. Olsen, L. Tøffner-Clausen, T.J. Sabaka, P. Brauer, J.M. Merayo, J.L. Jørgensen, J.M. Léger, O.V. Nielsen, F. Primdahl, T. Risbo, *Earth Planets Space*, **55**, 11–18 (2003)
8. M. Munschy, D. Boulanger, P. Ulrich, M. Bouiflane, *Journal of Applied Geophysics* **61**,168-183 (2007)
9. P. Le Maire, L. Bertrand, M. Munschy, M. Diraison, Y. Géraud, *Geophysical prospecting*, **68**, 2307-2319 (2020)
10. P. Elsass, J.P. von Eller, J.M. Stussi, *Notice carte géologique 307*, RP-56088-FR, (2008)
11. P. Le Maire, M. Munschy, E. Fixari, S. Nuns, GEOFCAN, Grenoble, France (2021)