

Levé opérationnel de magnétisme en drone couplé à un levé photogrammétrique à des fins de dépollution pyrotechnique

Operational drone magnetic survey coupled with a photogrammetric analysis for unexploded ordnance detection

Jeanne Mercier de Lépinay^{1,*}, *Baptiste Kiemes*¹, *Gwendal Deneux*¹, *Luis Miguel Sanabria*¹, and *Tristan Fréville*¹

¹Terremys, 67400 Illkirch-Graffenstaden, France

Abstract. The purpose of this study is an operational magnetic survey for the detection of unexploded ordnances (UXOs) using drones, coupled with a photogrammetric survey. The study of the electromagnetic noise generated by the drone and the solutions proposed to minimize it allows to ensure an acceptable data quality for the picking of UXO targets even in noisy environments. On the other hand, a planning method is proposed to allow flights over a terrain containing a large number of obstacles without using any embedded obstacle detection and avoidance system, while keeping adequate magnetic survey specifications for the detection of small metallic objects in the first meters of the subsurface. The planning is based on the analysis of photogrammetric data acquired before the magnetic survey. The resulting maps and detections show that the survey can locate UXO targets with an accuracy of about 50 cm despite the presence of numerous sources of electromagnetic noise in the study area.

Résumé. L'objet de cette étude est un levé opérationnel de diagnostic pyrotechnique par méthode magnétique en drone couplé à un levé photogrammétrique. L'étude des bruits électromagnétiques générés par le drone et les solutions proposées pour le minimiser permettent d'assurer une qualité de données acceptable pour les levés de diagnostic pyrotechnique. D'autre part, une méthode de planification est proposée pour permettre des vols sur un terrain contenant un nombre important d'obstacles sans utiliser de solution embarquée de détection et d'évitement d'obstacles, et tout en gardant des spécifications de levé magnétique suffisantes pour la détection de petits objets métallique dans les premiers mètres de la subsurface. La planification se base sur l'analyse de données photogrammétriques acquises en amont du levé

* Corresponding author: j.mercier@terremys.fr

magnétique. Les résultats de carte puis de pointé montrent que le levé permet d'isoler les cibles pyrotechniques avec une précision de l'ordre de 50 cm, et ce malgré la présence de nombreuses sources de bruit électromagnétique sur la zone d'étude.

1 Introduction

Lors de l'ouverture d'un terrain, la présence de munitions non-explosées met en danger la sécurité des personnes et peut entraîner une contamination des sites par les composés métalliques ou organiques toxiques qu'elles contiennent [1]. Réaliser une cartographie magnétique en amont des chantiers permet d'établir un état des lieux des objets métalliques en présence afin de préparer les campagnes de dépollution pyrotechniques.

La cartographie magnétique pour la dépollution pyrotechnique est traditionnellement effectuée par un opérateur à pied quadrillant le terrain à l'aide d'un ou généralement plusieurs capteurs magnétiques (sac à dos, chariots poussés ou tractés) et plus rarement, lorsque le terrain le permet, à l'aide de véhicules (quad, 4x4) tractant des chariots [2-4]. En effet, ces méthodes permettent de respecter des maillages de couverture et des distances sol-capteur inférieurs au mètre, indispensables pour la détection de petits objets métalliques en subsurface.

Les levés magnétiques en drone se popularisent [4-6]. Toutefois, la mauvaise compréhension des sources de bruits magnétiques et des erreurs de positionnement dues au tractage des capteurs [5] peuvent limiter l'utilisation de ces levés pour des applications de haute précision. Ils présentent pourtant l'avantage de pouvoir être menés au-dessus des zones présentant une forte saisonnalité comme les cultures, ou encore au-dessus des zones non-accessibles comme les marécages ou les zones protégées. De plus, l'utilisation des drones est souvent limitée par le manque de flexibilité des logiciels de planification, qui excluent les sites sur lesquels les obstacles sont nombreux ou la topographie est importante.

Nous présentons ici une métrologie maîtrisée permettant de réaliser des levés de précision à des fins de dépollution pyrotechnique ou archéologiques [7], ainsi qu'une méthode de planification appuyée sur des levés préliminaires de photogrammétrie aérienne, permettant d'acquérir des données dans des zones où les obstacles sont nombreux.

2 Métrologie

2.1 Drone utilisé

Le drone utilisé est un quadcopter monocapteur magnétique développé en interne intégrant un Lidar (pour le suivi de terrain en proche surface), un GNSS (précision métrique) et un GNSS RTK (précision centimétrique). Son poids total en vol est de 2,5 kg et son autonomie en mission est de 20 à 30 minutes, avec une vitesse maximale de 12 m/s et une résistance au vent jusqu'à 10 m/s.

Une carte de numérisation magnétique embarquée conçue sur mesure permet la synchronisation des données du contrôleur de vol avec la mesure magnétique. Cette dernière est réalisée par un capteur fluxgate Bartington MC03 fixé au bout d'une perche rigide de 1 m, positionnée sous le drone tel qu'illustré en Fig. 1, et déployée après décollage. La totalité

de la charge utile comprenant le capteur, la perche et la carte d'acquisition et synchronisation des données magnétiques, pèse 300 g.



Fig.1. Système d'acquisition magnétique EASYMAG [7] intégrant un capteur magnétique à un drone conçu spécifiquement. A gauche : système au sol, la plaque jaune et noir mesure 50 cm x 50 cm. A droite : système en vol. La perche rigide mesure 1 m dans cette étude.

2.2 Qualification de la mesure

Les procédures de calibration des magnétomètres fluxgate permettent par la même occasion de compenser le champ magnétique statique [8] généré par tout porteur qui serait attaché rigidement au capteur [9-10]. Réalisée en début et fin de journée de mission, cette procédure permet également de corriger les effets de dérive capteur [9]. L'anomalie d'intensité du champ magnétique peut être calculée avec une sensibilité de l'ordre de 1,5 nT à 25 Hz, alors même que l'anomalie mesurée sur les figures de mérite avant calibration est de l'ordre de 60 nT en moyenne (Fig. 2a).

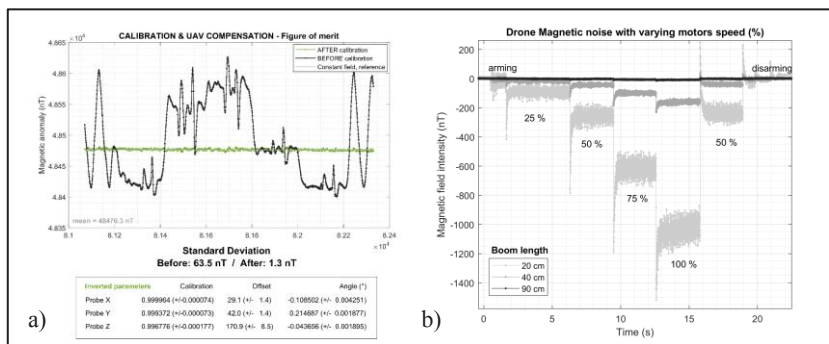


Fig. 2. Minimisation du bruit magnétique du drone. a) Exemple de l'intensité de l'anomalie magnétique mesurée pendant une figure de mérite de calibration, avec son écart-type avant (63,5 nT) et après (1,3 nT) application des paramètres de calibration. Ceux-ci sont indiqués dans le cadre en bas. b) Bruit magnétique du drone lorsque le régime des moteurs varie (% du régime maximum), à différents espacements drone-capteur. [7]

Une étude du porteur drone a été menée sur un banc d'essais développé spécifiquement et en conditions de test synthétique, afin de qualifier le bruit haute fréquence dû essentiellement à la proximité des moteurs. Le bruit électromagnétique pouvant perturber la mesure du champ magnétique ambiant est mesuré à différentes distances du drone avec des régimes moteurs variables (Fig. 2b). Un signal haute fréquence est observé, d'autant plus important que le capteur est proche des moteurs. Ce bruit haute fréquence, échantillonné ici à 500 Hz, subit un repliement de spectre important lorsque la fréquence de Nyquist est dépassée (250 Hz) [11]. En plus du bruit haut fréquence, une variation de moyenne du signal est observée lorsque le régime moteur du drone varie. Cette variation de valeur moyenne est répétable

pour chaque régime moteur étudié lors de tests sur banc. Grâce à cette étude, des moteurs sont sélectionnés pour la construction du drone afin de minimiser les bruits électromagnétiques. De plus, une perche déployable est implémentée au drone afin d'éloigner le plus possible le capteur des sources de bruit tout en gardant une flexibilité de vol optimale.

3 Contexte

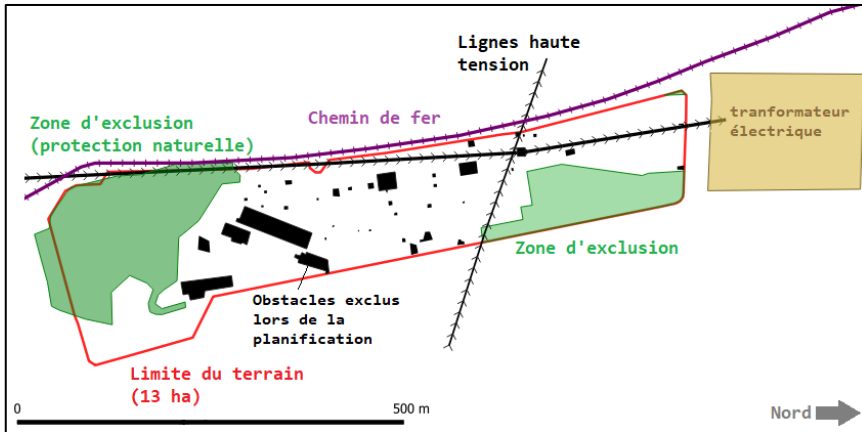


Fig. 3. Plan de la zone d'étude, structures anthropiques en bordure et obstacles délimités lors de la planification (polygones noirs).

La zone de levé de 8,4 ha (hors zones d'exclusion) est un terrain déboisé qui présente de nombreux obstacles au vol proche-surface ou à la marche à pied (souches d'arbres, talus, restes de bâtiments), comme présenté par la Fig. 3. La localisation du site est gardée anonyme pour des raisons de confidentialité. Ce site est traversé de part en part par deux lignes haute tension et bordé dans toute sa partie Nord par un transformateur électrique, ainsi que par des constructions à l'Est et à l'Ouest (ligne de chemin de fer en activité et canal artificiel).

4 Planification

Les données magnétiques sont échantillonnées à 125 Hz. Cette fréquence d'acquisition permet notamment d'échantillonner le signal 50 Hz des lignes hautes fréquence traversant la zone sans repliement de spectre.

Etant donné la dimension et les aimantations des cibles recherchées, les profils d'acquisition doivent être espacés de maximum 50 cm. Idéalement, la garde au sol du magnétomètre doit être cohérente avec l'espacement des profils [12]. Toutefois, afin d'assurer la sécurité des vols, une garde au sol de 1,50 m a été déterminée, ce qui permet de passer au-dessus d'un grand nombre d'obstacles ponctuels de faible hauteur. Le drone vole ainsi à 2,50 m du sol en drapant la topographie.

Lors de la planification, 4 types d'obstacles sont différenciés : des obstacles ponctuels franchissables ou non-franchissables et des obstacles continus de fort ou faible dénivelé. Les logiciels classiques de planification de vol en drone (Mission Planner, UGCS, QGC, DJI GS Pro) ne permettent pas de délimiter précisément les différents types d'obstacles et rendent impossible le levé magnétique drone en proche surface dans ce contexte.

Afin de contourner ce problème, un levé de photogrammétrie est mené en amont, à l'aide d'un drone DJI M300 RTK et d'un capteur Zenmuse P1, qui permet de générer un modèle numérique de surface précis au centimètre. La pente du modèle de surface est calculée afin de délimiter les zones de forte variation topographique. Ainsi, un détournement polygonal des zones est réalisé dans un logiciel de SIG. On distingue :

- Les zones de vol sans risque, incluant les obstacles ponctuels franchissables de hauteur inférieure à 1 m et les obstacles continus de faible dénivelé.
- Les zones de vol à risque, comportant les obstacles continus de fort dénivelé (essentiellement des talus et trous). Dans ces zones, la vitesse du drone est réduite afin de compenser le temps de réaction inhérent à l'utilisation d'un Lidar vertical pour draper le terrain.
- Les zones à contourner. Ces zones incluent les des obstacles ponctuels non franchissables : arbres et souches d'arbres, pylônes électriques, piquets, barrières.

Les zones de vol sécurisées au centimètre sont ensuite converties en plans de vol à l'aide d'un logiciel de planification de vol permettant l'import des polygones (Mission Planner).

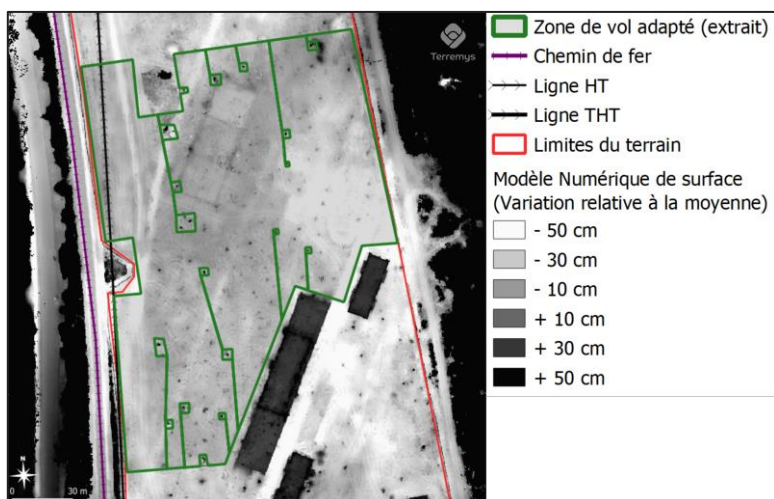


Fig.4. Fond de carte : Extrait du modèle numérique de surface, variations d'altitudes relatives de +/- 50 cm. Dans les limites du terrain (rouge), les obstacles de hauteur supérieure à 1 m apparaissent en noir. Le polygone vert montre un exemple de zone de vol décimée des obstacles infranchissables, qui est ensuite importée dans un logiciel de planification de vol.

5 Résultats

Une étude de qualité est menée sur les données acquises, celles-ci sont traitées (filtrage du 50 Hz et réduction de la temporelle) puis mises sous forme de carte (filtrage spatial, [13]). Ces cartes sont transformées en signal analytique et en anomalie gradiométrique verticale (Fig. 4). Cette dernière est obtenue à partir des mesures du champ total pour un espacement de capteurs de 50 cm autour de la hauteur d'acquisition réelle de 1 m (0,75 m et 1,25 m) [4].

A partir de ces cartes, un pointé semi-automatique est réalisé permettant de positionner les cibles et de les trier selon trois classes (A, B et C) en fonction de l'intensité de l'anomalie magnétique. La profondeur théorique des cibles est obtenue par inversion [9]. Des zones au sein desquelles le signal est trop bruité pour permettre la détection fiable de cibles sont également délimitées. Celles-ci sont différenciées en zones correspondant soit à la présence d'objets anthropiques identifiables en subsurface (dont infrastructures), soit à un

amoncellement non identifiable a priori. La densité de cibles pointées hors zones bruitées est de 146 cibles/ha.

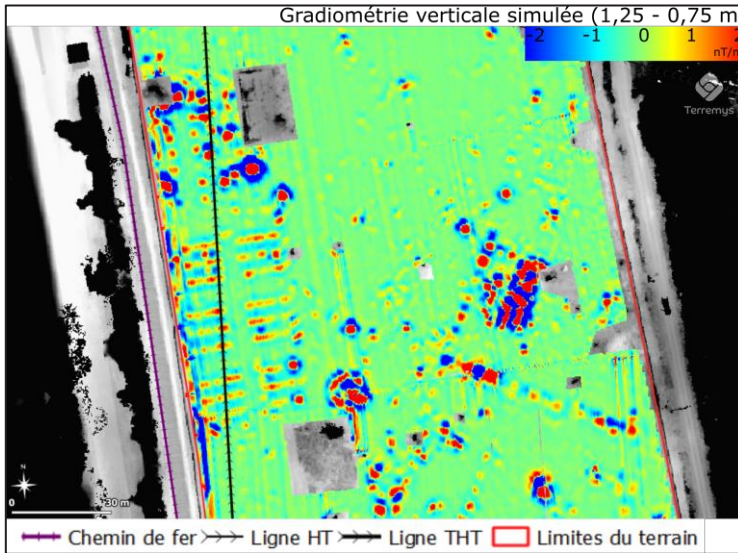


Fig. 4. Résultat de carte de gradiométrie verticale calculée (extrait), après traitement des données. Fond de carte : modèle numérique de surface (extrait) (Fig. 3).

Le relevé d'anomalie sur le terrain est actuellement en cours. A l'heure actuelle, il est constaté que dans l'ensemble, les cibles pointées correspondent bien à une anomalie de terrain (détecteur monosonde) avec une précision de localisation ≤ 50 cm.

References

1. A. E. Hooper, H. N. H. Hambric, *Unexploded ordnance (UXO): the problem, in Detection and Identification of Visually Obscured Targets*, Routledge, 1-8 (1999)
2. AGAP Qualité, *Fiche MAG02 – Magnétométrie Fluxgate*, Fiches de bonne pratique, (2016)
3. J. Milsom, *Field Geophysics*, Third Edition, Wiley, 51-70 (2003)
4. B. Gavazzi, P. Le Maire, J. Mercier de Lépinay, P. Calou, M. Munsch, *Fluxgate three-component magnetometers for cost-effective ground, UAV and airborne magnetic surveys for industrial and academic geoscience applications and comparison with current industrial standards through case studies*, GETE, **20**, (2019)
5. C. Walter, A. Braun, G. Fotopoulos, *Spectral Analysis of Magnetometer Swing in High-Resolution UAV-borne Aeromagnetic Surveys*, IEEE (STRATUS), 1-4, (2019)
6. P. Le Maire, L. Bertrand, M. Munsch, M. Diraison, Y. Géraud, *Aerial magnetic mapping with an unmanned aerial vehicle and a fluxgate magnetometer: A new method for rapid mapping and upscaling from the field to regional scale*, Geophysical Prospecting, **68**(7), 2307-2319, (2020)
7. J. Mercier de Lépinay, T. Fréville, B. Gavazzi, B. Kiemes, L. M. Sanabria, M. Munsch, H. Reiller, *A versatile solution for high-quality UAV fluxgate magnetic acquisitions*, Firstbreak, **39**(8), 57-62 (2021)

8. L. E. Tuck, C. Samson, J. Laliberté, M. Cunningham, *Magnetic interference mapping of four types of unmanned aircraft systems intended for aeromagnetic surveying*, *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, **10**(1),101-112, (2021)
9. M. Munsch, D. Boulanger, P. Ulrich, M. Bouiflane, *Magnetic mapping for the detection and characterization of UXO: Use of multi-sensor fluxgate 3-axis magnetometers and methods of interpretation*, *J. Appl. Geophys.*, **61**(3–4), 168–183 (2007)
10. A. Bronner, M. Munsch, D. Sauter, J. Carlut, R. Searle, A. Maineult, *Deep-tow 3C magnetic measurement: Solutions for calibration and interpretation*, *Geophysics*, **78**(3), J15–J23 (2013)
11. C. Walter, A. Braun, G. Fotopoulos, *Characterizing electromagnetic interference signals for unmanned aerial vehicle geophysical surveys*, *Geophysics*, **86**(6), J21-J32 (2021)
12. A. B. Reid, *Aeromagnetic survey design*, *Geophysics*, **45**(5), 973–976 (1980)
13. D. A. Keim, A. Herrmann, *The gridfit algorithm: An efficient and effective approach to visualizing large amounts of spatial data*, in *Proceedings Visualization '98 (Cat. No.98CB36276)*, 181-188, IEEE (1998)