



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Prospection magnétique par drone sur le site de l'ancien garage Laurent à Jarry, Guadeloupe

Rapport final

BRGM/RP-72058-FR

Version 1 du 26 juillet 2022

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM

Martelet Guillaume, Chapron Simon

Vérificateur :	
Nom :	Aurélie Peyrefitte
Fonction :	Géophysicienne
Date :	18/11/2022
Signature :	

Approbateur :	
Nom :	Ywenn De la Torre
Fonction :	Directeur Régional Guadeloupe
Date :	24/11/2022
Signature :	

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM
est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



Mots clés : Détection métaux enfouis, géophysique, aéromagnétisme, Guadeloupe

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Martelet Guillaume, Chapron Simon (2022) – Prospection magnétique par drone sur le site de l'ancien garage Laurent à Jarry, Guadeloupe. Rapport final V1. BRGM/RP-72058-FR, 8 p.

© BRGM, 2022, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-20/01/2022

Synthèse

La DEAL de Guadeloupe a missionné le BRGM afin de réaliser un levé magnétique sur une parcelle occupée illégalement et qui a fait l'objet d'un remblaiement. Des carcasses de voitures étant suspectées d'être enfouies sous le remblais, le BRGM a proposé de réaliser un levé magnétique afin de lever le doute. Ce levé avait pour objectifs principaux : 1/ de délimiter l'extension maximale des zones de dépôts dans la mangrove, 2/ de localiser ces dépôts aussi précisément que possible dans le sous-sol de la parcelle, pour orienter l'implantation de futurs forages.

Le levé magnétique, réalisé à l'aide d'un magnétomètre embarqué sur un drone a été mis en œuvre en quelques heures le 22/06/2022. Il a permis de couvrir le site d'étude à deux hauteurs : à haute résolution sur la partie dégagée de la parcelle (par un vol à 1,7m de hauteur) et à plus basse résolution, par un vol à 30 m de hauteur, couvrant de façon continue la parcelle découverte et son extension vers le nord et le nord-ouest, au-dessus de la mangrove.

Le traitement des données acquises a permis de produire deux cartes magnétiques de la zone, complémentaires par leur résolution et leur extension. L'interprétation de ces cartes, au regard de photographies aériennes, complétées de données sur le relief et d'informations sur l'histoire du site recueillies auprès d'un témoin ayant travaillé de longue date sur le site, ont permis d'apporter les observations et conclusions suivantes :

- La partie découverte du site d'étude est globalement très magnétique, avec des variations magnétiques tout à fait inhabituelles de plusieurs centaines à milliers de nanoTeslas (selon l'altitude de mesure). Le caractère principalement dipolaire des signaux, leurs grandes dimensions et leur forte intensité laisse penser à une dissémination (ou un amas) quasi-continu de pièces métallique dans le sous-sol, sur la plus grande partie de la parcelle découverte. Cette image est cohérente avec la « lasagne de carcasses de voitures » évoquée par notre témoin.
- Un peu plus dans le détail, le site d'étude présente trois zones de signatures magnétiques différenciées : un magnétisme très fort au sud de la parcelle, intermédiaire au nord-ouest de la zone dégagée, faible plus au nord dans la mangrove. Cette observation s'interprète qualitativement par une plus forte épaisseur (ou densité de débris ferreux) au sud de la parcelle, un contenu ferreux moyen et/ou une épaisseur de débris moins importante dans la partie nord-ouest de la plateforme et peu ou pas de débris en direction du nord dans la mangrove.
- Encore plus dans le détail, les cartes magnétiques révèlent, sous la plateforme dégagée, la présence d'un « couloir » relativement moins magnétique orienté SO-NE, qui sépare la zone très magnétique au sud de la zone moyennement magnétique au nord-ouest. En recoupant cette observation avec des photographies du site de différentes périodes, on observe que ce « couloir » semble ne pas avoir fait l'objet d'entreposage de carcasses de voitures ; il pourrait ainsi, en sous-sol, être essentiellement comblé par du tuf calcaire.
- À la question de l'extension maximale des débris/carcasses d'automobiles au-delà de la partie découverte du site, dans la mangrove, on observe une très bonne cohérence entre la limite d'extension de la zone magnétique au nord et au nord-ouest et un ressaut topographique (lorsqu'il est observé). La combinaison de ces deux informations permet une délimitation fiable de l'extension de la zone des dépôts anthropiques dans la mangrove, cohérente avec l'information recueillie dans des photographies aériennes remontant jusqu'aux années 2000.
- Enfin, une modélisation magnétique le long d'un profil recoupant le site permet, de façon simplifiée, avec des hypothèses raisonnables, 1/ de produire une coupe des dépôts

métalliques du site, cohérente avec les éléments résumés ci-avant, 2/ de fournir une estimation de l'épaisseur des dépôts métalliques, évalués entre de 2 et 6 m d'épaisseur environ, dans les principaux compartiments magnétiques de la parcelle, tels que délimités en carte.

Sommaire

1. Introduction.....	7
2. Acquisition de données	9
2.1. Moyens mis en oeuvre.....	9
2.2. Mesures réalisées.....	11
2.2.1. <i>Mesures magnétiques dynamiques (sur drone et au sol)</i>	11
2.2.2. <i>Étalonnage dynamique du magnétomètre fluxgate (embarqué sur le drone)</i>	13
2.2.3. <i>Mesures magnétiques statiques (base magnétique)</i>	14
3. Traitement des données magnétiques	15
3.1. Compensation des mesures magnétiques du capteur fluxgate embarqué sur le drone	15
3.2. Correction des variations temporelles du champ magnétique	16
3.3. Production de la carte du champ magnétique total.....	17
3.4. Production des cartes dérivées du champ magnétique	19
3.4.1. <i>Réduction au pôle</i>	19
3.4.2. <i>Signal analytique</i>	20
4. Interprétation des cartes magnétiques	22
4.1. Anatomie de la parcelle	23
4.2. Interprétation cartographique des données magnétiques.....	24
4.3. Ordre de grandeur de l'épaisseur des dépôts métalliques par modélisation des données magnétiques	26
5. Conclusions.....	29
6. Bibliographie.....	30

Liste des figures

Figure 1 : Drone Mavic 3 équipé d'un magnétomètre fluxgate, utilisé pour réaliser le levé magnétique sur la zone d'étude	10
Figure 2 : Installation de la base magnétique GSM19-T utilisée pendant les levés drones pour l'enregistrement des variations temporelles du champs magnétique.....	10
Figure 3 : Plan de vol réalisé à 30 m de hauteur, couvrant la parcelle découverte et s'étendant au nord au-dessus de la mangrove. Le fond de carte photographique est une image prise lors de la mission, à l'aide du drone Mavic 3.	11
Figure 4 : Plan de vol réalisé à 1,7 m de hauteur, couvrant en détail la parcelle découverte. ...	12
Figure 5 : Plan de de position réalisé au sol à 50 cm de hauteur, couvrant en détail la parcelle découverte, dans un but de recoupement de la cartographie obtenue par drone.....	13
Figure 6 : Enregistrement des variations magnétiques temporelles au cours de la journée du 22/06/2022.	14
Figure 7 : Eléments de contrôle de l'étalonnage du capteur magnétique fluxgate embarqué sur le drone. Se reporter au texte pour la signification des différentes parties de la figure.	16
Figure 8 : Champ magnétique total le long des trajectoires de vol.	17

Figure 9 : Champ magnétique total interpolé aux nœuds d'une grille régulière, pour le levé à 30 m de hauteur (à gauche), pour le levé à 1,7 m de hauteur (au centre) et pour le levé au sol à 50 cm de hauteur (à droite).	18
Figure 10 : Champ magnétique réduit au pôle, pour les levés par drone, à 30 m de hauteur (à gauche), et à 1,7 m de hauteur (à droite).	20
Figure 11 : Signal analytique du champ magnétique, pour les levés par drone, à 30 m de hauteur (à gauche), et à 1,7 m de hauteur (à droite).	22
Figure 12 : Vues du site d'étude : a) du sud vers le nord, la partie dégagée se terminant dans la mangrove en fond d'image, de l'est vers l'ouest, la partie dégagée se terminant dans la mangrove en fond d'image.	23
Figure 13 : Débris de véhicules variés observés sur tout le pourtour de la plateforme dégagée et à faible distance dans la mangrove.	24
Figure 14 : Carte du signal analytique magnétique (en dégradés de couleur et isocontours) superposée à des photographies aériennes de l'IGN : « récente » à gauche, datant de 2000-2005 à droite. Sur les deux photographies, les petites taches blanches sont des voitures entreposées. L'analyse croisée de ces informations est fournie dans le texte ; le liseré rouge constitue la limite d'extension maximale des débris et carcasses de voitures, interprétée par recoupement des données magnétiques et photo. La ligne blanche localise le profil magnétique modélisé.....	26
Figure 15 : Profil magnétique modélisé le long de la coupe AB, localisée en Figure 14b. La fenêtre du bas présente la géométrie modélisée des dépôts métalliques ; leur effet magnétique est représenté par la ligne continue dans la fenêtre du haut, qui doit être ajustée aux données mesurées (points dans la fenêtre du haut). On se reportera au texte pour le commentaire du modèle.	28

Liste des annexes

1. Introduction

L'ancienne casse automobile dite du « Garage Laurent », du nom du propriétaire historique se trouve dans la zone industrielle de Jarry ([Figure 1](#)). Durant son exploitation le site s'est étendu vers le nord en « rognant » sur la forêt humide. Cette extension a été progressive et peut être facilement suivie grâce aux photographies aériennes historiques. La nouvelle surface ainsi exploitée se trouve être sur une parcelle dont le Conservatoire du Littoral (CDL) devient affectataire en 2010. En 2016, le CDL lance le projet JA-RIV ayant pour objectif de reconquérir son foncier afin de restaurer et protéger les milieux naturels.



*Figure 1 : Emplacement du site dit « du garage Laurent »
Source : Géoportail*

Ainsi l'occupation du « garage Laurent » prend fin. Il s'avère que l'extension utilisée a été remblayée sur environ 2 m de haut et des témoignages mentionnent l'usage de carcasses de véhicules utilisées comme remplissage. Cette théorie semble d'autant plus crédible qu'une partie de l'activité du site consistait en une casse automobile. Cette hypothèse entraîne un certain nombre de contraintes. En effet, l'enchaînement logique du projet JA-RIV implique de faire un diagnostic site et sols pollués de la parcelle afin d'établir un plan de gestion en cas de pollution des milieux. Or, le diagnostic implique de réaliser des sondages du sol pour prélever les échantillons à analyser. S'il s'avère que des véhicules ou tout autre masse métallique d'envergure est enfouie au droit du site alors il y a un risque de détériorer le matériel de sondage voire de rendre l'échantillonnage impossible.

Dans ce contexte, la DEAL a missionné le BRGM afin de confirmer ou d'infirmer la présence de carcasses métalliques enfouies au droit du site et d'en préciser, si possible, l'extension horizontale et verticale. Cela dans le but d'avoir ensuite une carte permettant de réaliser les sondages en toute sécurité.

Pour répondre à cette problématique, le BRGM a recommandé de mettre en œuvre un levé de mesures magnétiques sur le site d'étude, préalablement aux diagnostics de sol. En effet, la méthode géophysique magnétique est la plus couramment mise en œuvre pour localiser des objets métalliques enterrés. Par ailleurs, cette méthode peut être mise en œuvre sur drone volant, ce qui permet, dans le cas présent, d'étendre le diagnostic dans la zone de mangrove, sans limitation d'accès.

Les levés ont été mis en œuvre en détail sur la zone d'accès découvert, avec un vol à 1,7 m de hauteur environ, complété d'une acquisition de contrôle au sol. Sur la zone complète du chantier, étendue au-dessus de la mangrove, un levé de plus basse résolution, a été réalisé au-dessus des arbres, à 30 m de haut environ. Les cartes produites sont interprétées au regard des objectifs de l'étude.

2. Acquisition de données

2.1. PREPARATION DU SITE

Pour permettre les relevés avec le moins d'interférences de surface que possible, le site d'étude a été débarrassé une semaine avant les levés de tout ce qui y était entreposé, par l'entreprise de recyclage qui occupe le site. Un « grattage » du sol, qui consiste à passer un bulldozer avec un godet à dent qui racle le sol et joue donc un peu le rôle de râteau, a également été réalisé afin d'essayer de limiter les éléments métalliques en surface.

2.2. MOYENS MIS EN OEUVRE

La semaine du 20 au 24 Juin 2022, l'équipe du BRGM a mis en œuvre les moyens de terrain nécessaires à la cartographie magnétique du site d'étude. En pratique, les levés ont nécessité :

- Un drone semi-léger quadricoptère – Mavic 3 de marque DJI,
- Un magnétomètre triaxe fluxgate Bartington, associé à une électronique 20F1 de Diéfi. Ce matériel de faible poids et encombrement a été embarqué sur le drone ([Figure 2](#)),
- Un magnétomètre scalaire de terrain GSM19-T de GEM, qui enregistre en un point fixe du terrain les variations temporelles du champ magnétique pendant les levés drone ([Figure 3](#)).



Figure 2 : Drone Mavic 3 équipé d'un magnétomètre fluxgate, utilisé pour réaliser le levé magnétique sur la zone d'étude



Figure 3 : Installation de la base magnétique GSM19-T utilisée pendant les levés drones pour l'enregistrement des variations temporelles du champs magnétique.

2.3. MESURES REALISEES

2.3.1. Mesures magnétiques dynamiques (sur drone et au sol)

Pour couvrir la zone d'étude, les mesures principales réalisées ont été mises en œuvre sur drone. Un levé au sol a également été mis en œuvre, à titre de recoupement des informations. L'ensemble de ces mesures s'accompagne d'un positionnement simultané par GPS, qui permet donc de localiser à quelques dizaines de centimètres près les mesures magnétiques.

Par moyen aéroporté ultraléger – utilisant le drone Mavic 3 (Figure 2), deux couvertures magnétiques successives ont été réalisées dans la journée du 22/06/2022 :

- La 1^{ière}, réalisée à 30 m au-dessus du sol et un espacement de lignes de vol de 15 à 20 m, a permis de couvrir la partie découverte de la parcelle et d'étendre la cartographie au-dessus de la mangrove, avec pour principal objectif de rechercher une éventuelle extension des déblais de la casse en direction du nord, dans la mangrove (Figure 4).

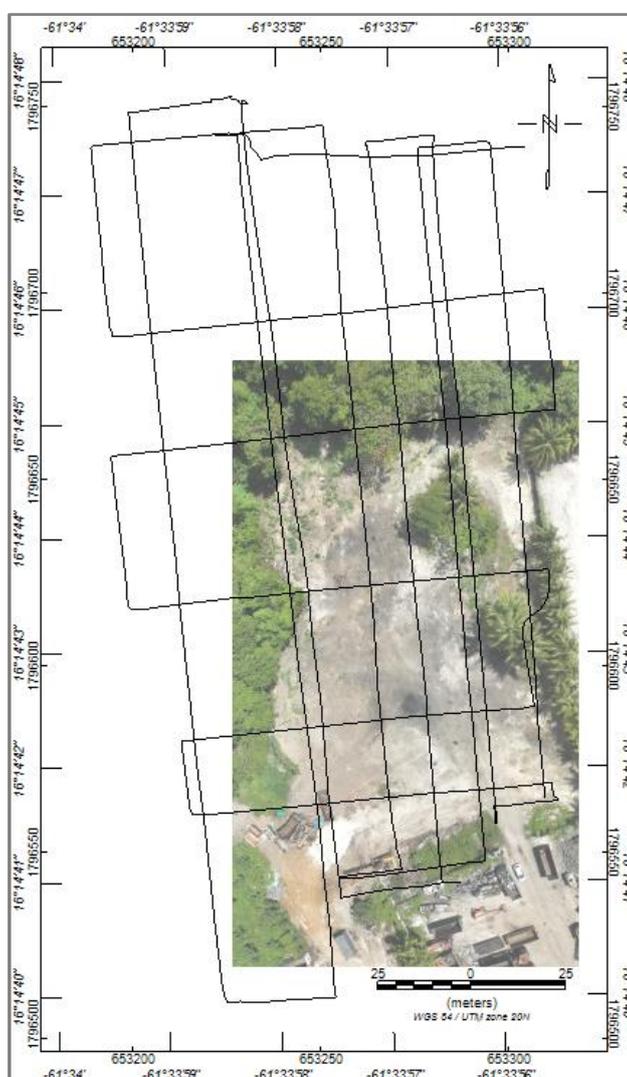


Figure 4 : Plan de vol réalisé à 30 m de hauteur, couvrant la parcelle découverte et s'étendant au nord au-dessus de la mangrove. Le fond de carte photographique est une image prise lors de la mission, à l'aide du drone Mavic 3.

- La 2^{ème} couverture magnétique réalisée à 1,7 m au-dessus du sol environ, avec un espacement de lignes de vol de l'ordre de 2 à 3 m, a permis de cartographier la partie découverte de la parcelle de façon détaillée (Figure 5).



Figure 5 : Plan de vol réalisé à 1,7 m de hauteur, couvrant en détail la parcelle découverte.

Sur l'emprise découverte de la parcelle, à titre de recoupement avec la cartographie obtenue en drone, un levé au sol a été réalisé à 50 cm du sol, à l'aide du magnétomètre de terrain GSM19-T (Figure 6). Pour cela le capteur magnétique a été fixé à cette hauteur sur la canne de mesure, porté de proche en proche par l'opérateur.



Figure 6 : Plan de de position réalisé au sol à 50 cm de hauteur, couvrant en détail la parcelle découverte, dans un but de recouplement de la cartographie obtenue par drone.

2.3.2. Etalonnage dynamique du magnétomètre fluxgate (embarqué sur le drone)

L'utilisation d'un magnétomètre directement fixé à un drone implique des perturbations magnétiques : par la présence de pièces métalliques et par la rotation des moteurs, qui sont perçues par le capteur. Pour les magnétomètres vectoriels de type fluxgate, tel que celui mis en œuvre sur le drone, ces effets ont été étudiés de longue date (pour la mesure magnétométrique embarquée sur avions, hélicoptères ou dans des satellites ; cf. Olsen et al., 2003). Pour s'affranchir de ces perturbations, on applique un algorithme dit « de compensation » aux données mesurées.

Mais l'algorithme doit au préalable être « entraîné » sur les données d'un vol dit « d'étalonnage ». En pratique, il s'agit, suivant les 4 axes cardinaux, d'appliquer au drone une séquence de mouvements prédéterminés permettant de faire varier ses 3 angles de gouverne : le roulis, le tangage et le lacet.

Cette séquence de mouvements, réalisée en vol, à une centaine de mètres de hauteur (pour s'affranchir au maximum des effets magnétiques du sol), est mise en œuvre en début et fin de chaque vol de production. Les données de ces vols d'étalonnage servent à calibrer les facteurs de compensation – qui sont appliqués aux données de production acquises au cours du même vol. Un exemple de l'effet de la compensation est fourni dans le paragraphe sur les traitements.

2.3.3. Mesures magnétiques statiques (base magnétique)

Pour ne restituer que les variations magnétiques cartographiques, les mesures magnétiques acquises sur le drone doivent être corrigées des fluctuations temporelles du champ magnétique (cf. paragraphe sur les traitements). Pour cela, une « base magnétique » est laissée en enregistrement en un point statique (Figure 3).

L'implantation de cette base magnétique doit être réalisée dans un environnement « magnétiquement calme », c'est-à-dire à l'écart de toute activité et à distance de fils électriques, moteurs, pièces métalliques qui pourraient perturber ou distordre le champ local. Pour cela, on a vérifié lors de l'implantation que les variations magnétiques dans un rayon de 20 m autour du site choisi n'excédaient pas 1 nT/m : pour cela, deux profils en croix centrés sur le point de base ont été parcourus avec le magnétomètre, permettant de calculer la variation du champ magnétique le long des 10 m de chacune des branches de la croix.

Le 22/06/2022, le magnétomètre GSM19-T utilisé en base a échantillonné le signal magnétique toutes les 5 secondes. Il a enregistré les variations temporelles du champ magnétique près d'une heure avant les vols et pendant toute la durée des vols d'acquisition magnétique par drone, (Figure 7).

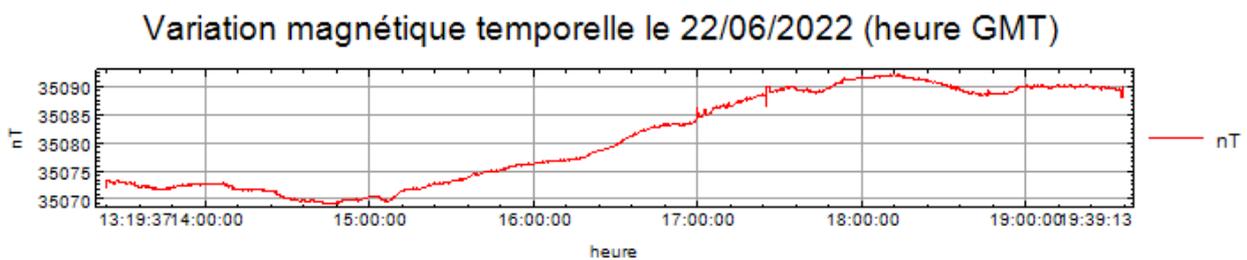


Figure 7 : Enregistrement des variations magnétiques temporelles au cours de la journée du 22/06/2022.

Les données enregistrées à la base magnétique ont été inspectées : il n'y a pas été relevé de comportement anormal ou saut de mesure de type « spike ».

Par ailleurs, les variations temporelles enregistrées ne traduisent pas de comportement « d'orage magnétique » : avec des variations brusques, de forte amplitude et sur des durées de plusieurs minutes à heure.

Enfin, les fluctuations ne dépassent pas les seuils recommandés de 3,0 nT (pic à pic) pour 1 mn, ou 0,5 nT pour 15 sec., ce qui traduit des conditions d'agitation magnétique normale.

3. Traitement des données magnétiques

Pour produire des cartes dites « d'anomalies magnétiques » support d'interprétation, un certain nombre d'étapes de traitement ont été mises en œuvre sur les données acquises décrites précédemment.

On développe ci-après les traitements suivants :

- la compensation des mesures magnétiques du capteur fluxgate embarqué sur le drone,
- la correction des variations temporelles du champ magnétique,

A noter que compte-tenu des fortes intensités mesurées sur la zone, les deux traitements ci-dessus ont été suffisants pour obtenir une carte de bonne cohérence : il n'a pas été nécessaire de réaliser ni la correction de « lag » (décalage spatial de la mesure magnétique par rapport à la mesure GPS), ni la correction de « heading » (correction de la mesure en fonction de la direction dans laquelle vole le drone) et il n'a pas été réalisé de nivellement entre les lignes de vol et les recoupes perpendiculaires : toutes ces corrections de faible intensité sont négligeables au regard des signaux de forte intensité magnétique sur la zone.

3.1. COMPENSATION DES MESURES MAGNETIQUES DU CAPTEUR FLUXGATE EMBARQUE SUR LE DRONE

En début et fin de chaque vol du drone, une figure de calibration du magnétomètre fluxgate embarqué a été réalisée. Elle permet l'apprentissage d'un algorithme de compensation qui permet de corriger l'essentiel des perturbations induites par le drone sur la mesure magnétique.

Un exemple de vol d'étalonnage est présenté ci-après (Figure 8), il s'agit du vol d'étalonnage réalisé avant la couverture à 1,7 m de hauteur.

Dans la partie gauche de la figure, en rouge est représentée la partie de la trajectoire de vol correspondant à la séquence de mouvements du drone. En bas à droite sont représentées les mesures magnétiques enregistrées sur chacun des 3 axes du capteur fluxgate au cours de la séquence de manœuvres du drone. En haut à droite est représenté en bleu le module du champ magnétique dérivé des 3 composantes et en rouge ce même module après application des coefficients de compensation (tableau du bas) déterminés par l'algorithme d'Olsen et al. (2003).

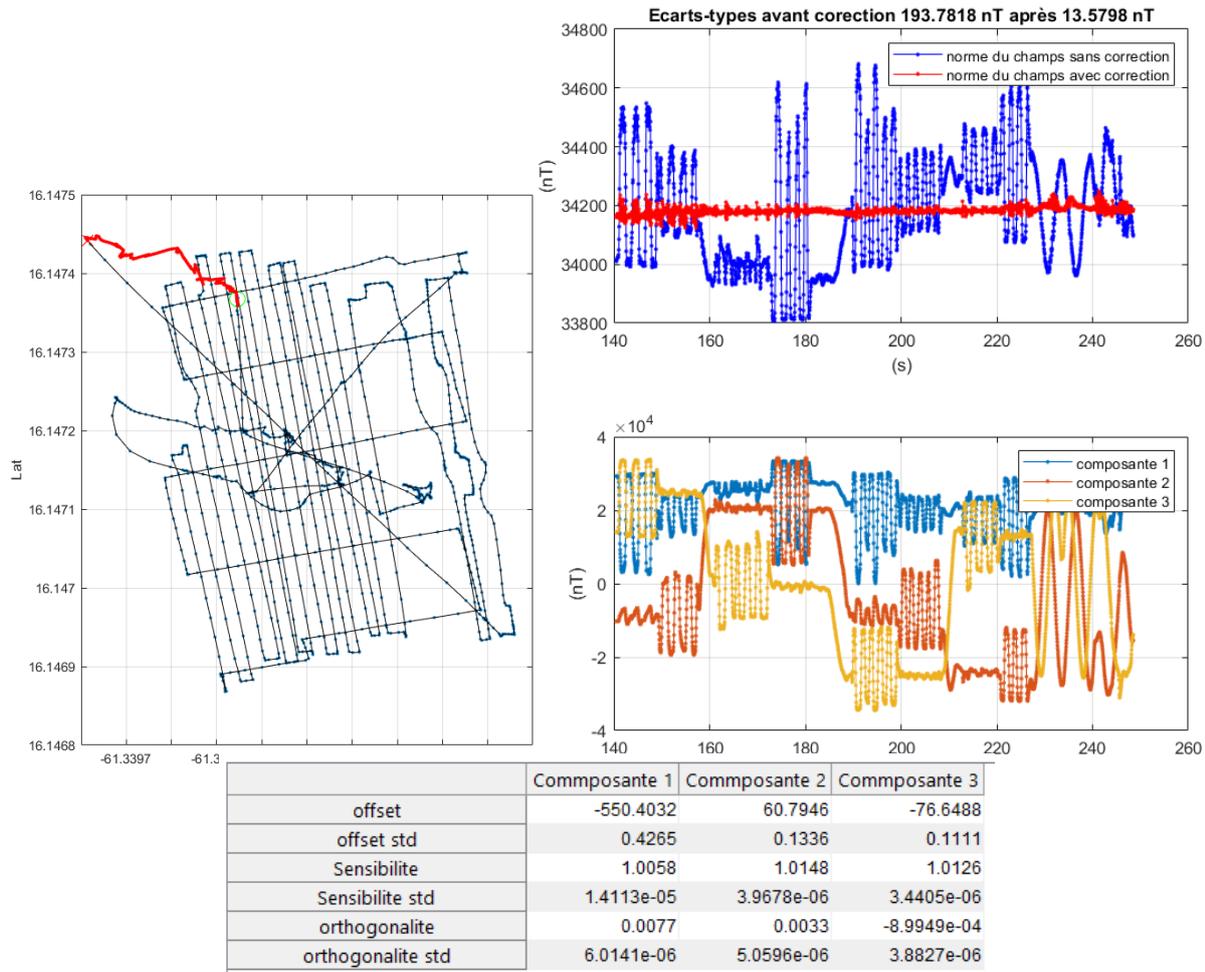


Figure 8 : Eléments de contrôle de l'étalonnage du capteur magnétique fluxgate embarqué sur le drone. Se reporter au texte pour la signification des différentes parties de la figure.

On constate que l'amplitude des variations du module du champ magnétique après compensation est largement réduite par rapport au module brut : la compensation a permis de s'affranchir d'effets magnétiques liés au drone. Le module du champ magnétique compensé sera utilisé dans la suite comme base des autres traitements appliqués, en vue de produire les cartes magnétiques.

3.2. CORRECTION DES VARIATIONS TEMPORELLES DU CHAMP MAGNETIQUE

Le champ magnétique varie spatialement mais aussi au cours du temps. Pour réaliser une cartographie magnétique, seule les variations spatiales doivent être considérées, on retire donc les variations temporelles des mesures magnétiques enregistrées sur le drone. Cette correction est réalisée très simplement : elle consiste à retrancher aux données magnétiques acquises sur le drone, les variations temporelles mesurées à la base magnétique fixe (Figure 7). Cela est réalisé point à point en synchronisant les 2 sources de données grâce au temps GPS enregistré à la fois sur le drone et sur la base magnétique.

3.3. PRODUCTION DE LA CARTE DU CHAMP MAGNETIQUE TOTAL

Les données corrigées selon les étapes précitées aboutissent au champ magnétique total. Elles peuvent être représentées cartographiquement sous forme de points de mesures (Figure 9). On y observe les variations du champ magnétique le long des trajectoires de vol ainsi que la densité réelle des mesures acquises. L'image donne l'impression que la mesure est continue le long des trajectoires de vol ; elle est en fait ponctuelle, à une fréquence de 25 Hz, ce qui, pour une vitesse de vol de 5 m/s, produit une mesure magnétique tous les 20 cm environ.

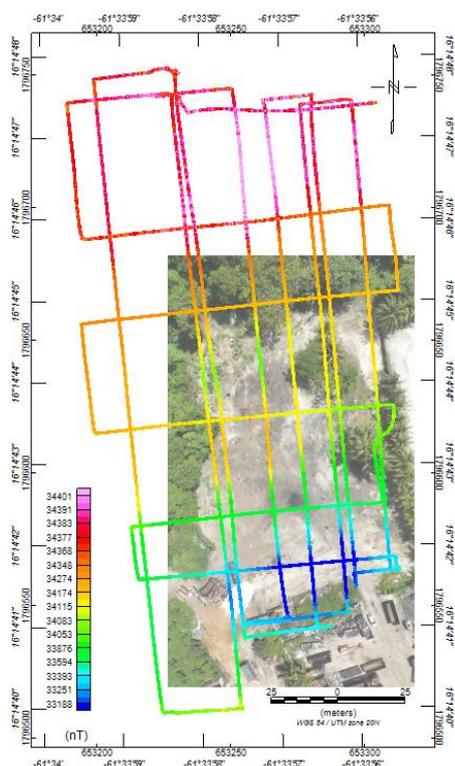


Figure 9 : Champ magnétique total le long des trajectoires de vol.

Plus couramment, pour permettre une lecture facilitée des cartes magnétiques, les données sont interpolées aux nœuds d'une grille régulière, permettant une visualisation continue du champ sur la zone d'étude. Classiquement cette interpolation peut être réalisée jusqu'au $\frac{1}{4}$ de la distance entre lignes de vol. Sur cette étude, la grille étendue (du vol à 30m de hauteur) a été interpolée au pas de 5 m et les grilles sur la zone découverte (du vol à 1,7 m et du levé au sol) ont été interpolées au pas de 1 m. Elles sont présentées en Figure 10.

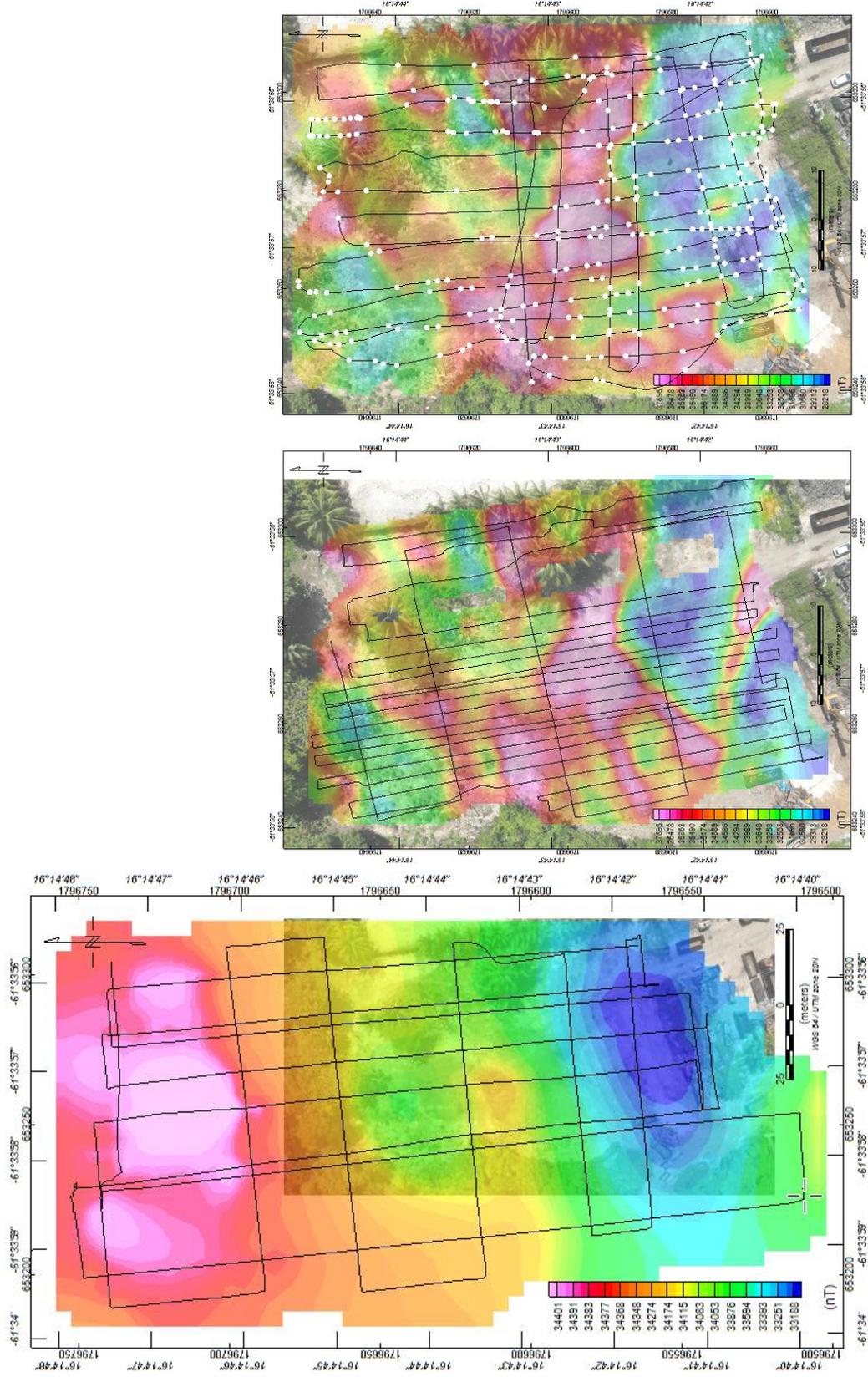


Figure 10 : Champ magnétique total interpolé aux nœuds d'une grille régulière, pour le levé à 30 m de hauteur (à gauche), pour le levé à 1,7 m de hauteur (au centre) et pour le levé au sol à 50 cm de hauteur (à droite).

Les 3 cartes de champ total produites montrent globalement des variations dont on peut dire :

- qu'elles restituent des variations continues spatialement sur la zone d'étude, ce qui montre la cohérence interne des données de chacun des 3 levés et que le niveau de traitement appliqué est suffisant, puisque d'une mesure à l'autre on n'observe pas de variation erratique,
- que les 3 cartes présentent une zone faiblement magnétique cohérente (dans les tons bleus) au sud de la zone,
- que la carte dérivée du vol à 30 m de haut (à gauche) est nettement moins détaillée que les deux autres réalisées à 1,7 et 0,5m du sol,
- que les deux cartes réalisées à faible hauteur par rapport au sol sont très cohérentes, réalisées l'une avec le capteur fluxgate sur le drone à 1,7m du sol (au centre), l'autre avec le magnétomètre scalaire GSM19-T à 50 cm du sol (à droite).

Ce dernier point montre la bonne qualité des données magnétiques acquises par le drone.

Enfin, il faut noter la forte amplitude des variations magnétiques enregistrées : plus de 1000 nT à 30 m du sol, encore amplifiées à faible hauteur par rapport au sol (dépassant 5000 nT) et provoquant même la saturation du magnétomètre GSM19-T à 50 cm du sol. En effet, les points blancs sur la carte de droite de la [Figure 10](#) représentent des mesures particulièrement fortes ayant saturé le magnétomètre (pas de mesure restituée). **De si fortes variations sur une toute petite zone laissent penser que le sous-sol de la zone d'étude est anormalement magnétique.** La cohérence des 3 levés lève le doute sur d'éventuels problèmes des mesures acquises.

Les cartes de champ magnétique total ne sont pas interprétées davantage à ce stade : un certain nombre d'opérateurs classiques sont appliqués aux données ci-après, pour en faire ressortir des caractéristiques particulières et en faciliter l'interprétation.

A noter : dans le cas présent, compte-tenu du fait que la zone d'étude est toute petite, le retrait classique d'une tendance régionale suivant l'IGRF pour obtenir la carte « d'anomalies magnétiques » n'a pas été fait (car l'IGRF aurait été constant sur la zone). C'est donc sur la base du champ total que sont réalisés les traitements présentés dans la suite.

3.4. PRODUCTION DES CARTES DERIVEES DU CHAMP MAGNETIQUE

3.4.1. Réduction au pôle

La première transformation classique appliquée aux données magnétiques est la réduction au pôle. Elle est destinée à s'affranchir des distorsions de la carte magnétique dues au fait que le champ magnétique terrestre n'est pas vertical (sauf aux pôles). Cet opérateur mathématique appliqué aux données permet de simuler le champ magnétique comme s'il avait été mesuré au pôle, c'est-à-dire en champ vertical et ainsi cela permet de repositionner les signaux magnétiques à l'aplomb des sources qui en sont à l'origine, dans le sous-sol. Il est à noter que cet opérateur ne produit l'effet escompté que lorsque l'aimantation des sources est de nature induite. Si l'aimantation est majoritairement rémanente, la réduction au pôle n'aura pas l'effet escompté : le signal magnétique ne sera pas repositionné à l'aplomb de sa source et il conservera un caractère dipolaire, c'est-à-dire constitué en carte de deux lobes positif et négatif associés.

La réduction au pôle a été réalisée en utilisant les paramètres de l'IGRF à la date et à la localisation/altitude du levé, soit : avec une inclinaison $I=36,901^\circ$ et une déclinaison $D=-15,001^\circ$. Les cartes produites pour les 2 levés réalisés par drone sont présentées en [Figure 11](#).

On observe clairement sur les deux cartes de la [Figure 11](#) la présence signatures magnétiques dipolaires (marquées par un lobe rouge jouxtant un lobe bleu), ce qui traduit la présence de corps magnétiques d'aimantation principalement rémanente. Cela n'est pas surprenant : les métaux contenus dans une voiture possèdent généralement une aimantation principalement rémanente.

Sur la carte levée à 30 m de hauteur, la partie sud est marquée par une très forte signature dipolaire A-A', qui se décompose en deux signaux dipolaires plus localisés a-a' et a''-a''' sur la carte détaillée levée à 1,7 m de hauteur. Une seconde signature dipolaire B-B' moins intense est visible dans la partie centrale de la carte à 30 m, dont on ne voit que le lobe positif b dans la carte à 1,7 m.

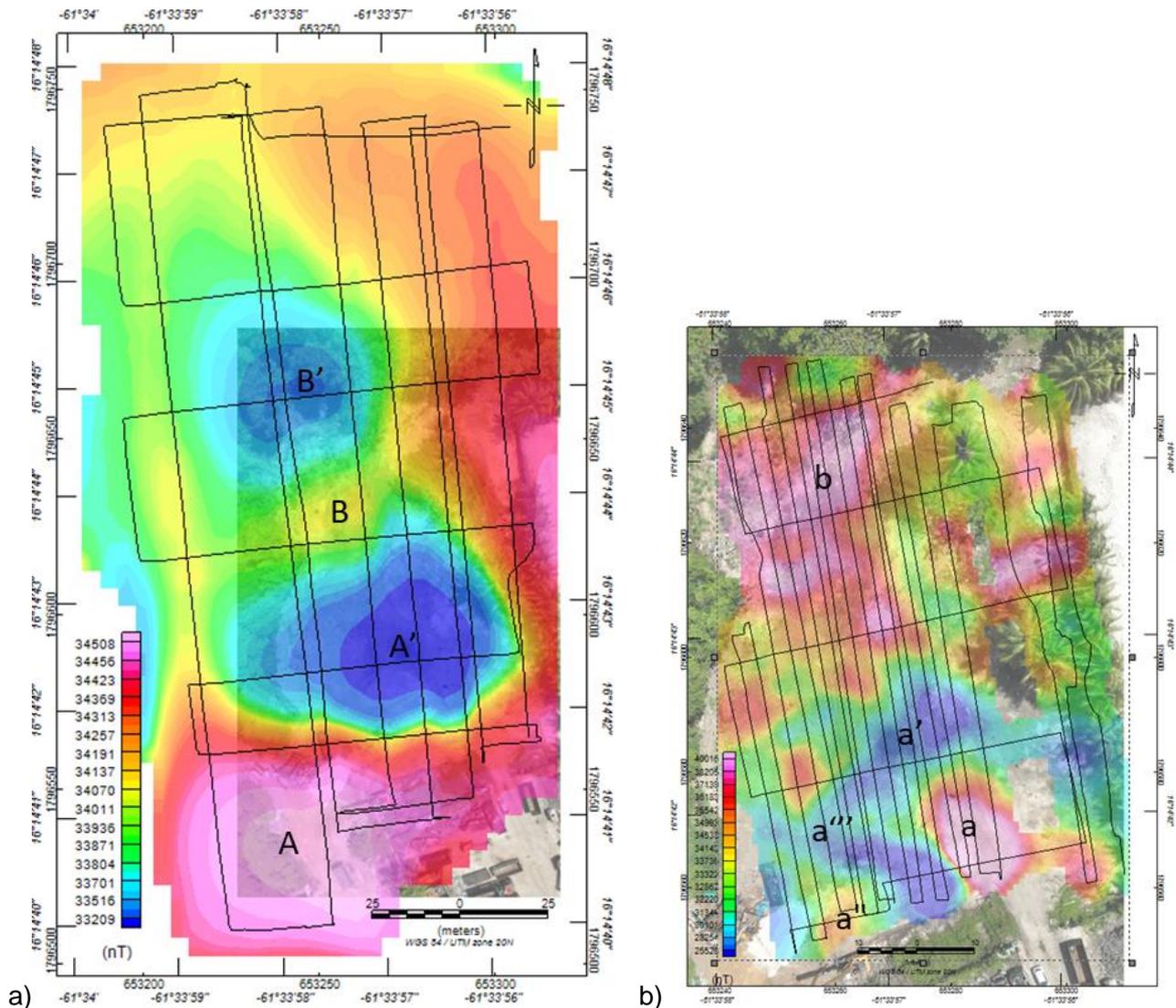


Figure 11 : Champ magnétique réduit au pôle, pour les levés par drone, à 30 m de hauteur (à gauche), et à 1,7 m de hauteur (à droite).

3.4.2. Signal analytique

Compte-tenu du caractère principalement rémanent de l'aimantation des sources magnétiques mis en évidence sur le site, l'application d'opérateurs de type gradient vertical ou tilt derivative n'a pas apporté d'élément déterminant dans la problématique posée, ces cartes ne sont donc

pas exposées. On présente plutôt la carte du signal analytique obtenue pour les deux levés par drone, à 30 m et 1,7 m de hauteur.

En effet, l'opérateur de signal analytique (résultant d'une combinaison de gradients verticaux et horizontaux), présente la propriété intéressante de relocaliser les signaux magnétiques à l'aplomb de leur source, quel que soit leur type d'aimantation, induite ou rémanente.

Les cartes de signal analytique produites pour les 2 levés réalisés par drone sont présentées en [Figure 12](#). La lecture des cartes magnétiques est ainsi nettement simplifiée. On observe principalement pour les deux cartes les éléments suivants :

- pour les deux levés, à 30 m et 1,7m de hauteur, au sud de la carte une zone très magnétique, s'étendant depuis le sud de la zone investiguée, en direction du nord, jusqu'à une zone moins magnétique recoupant la parcelle découverte selon une direction SO-NE,
- un axe SO-NE relativement peu magnétique recoupant la parcelle aux 2/3 environ de sa partie découverte,
- une zone moyennement magnétique occupant l'angle NO de la parcelle découverte,
- au nord de la parcelle découverte, une zone peu magnétique.

L'ensemble de ces éléments sont repris et contextualisés dans le paragraphe suivant consacré à l'interprétation.

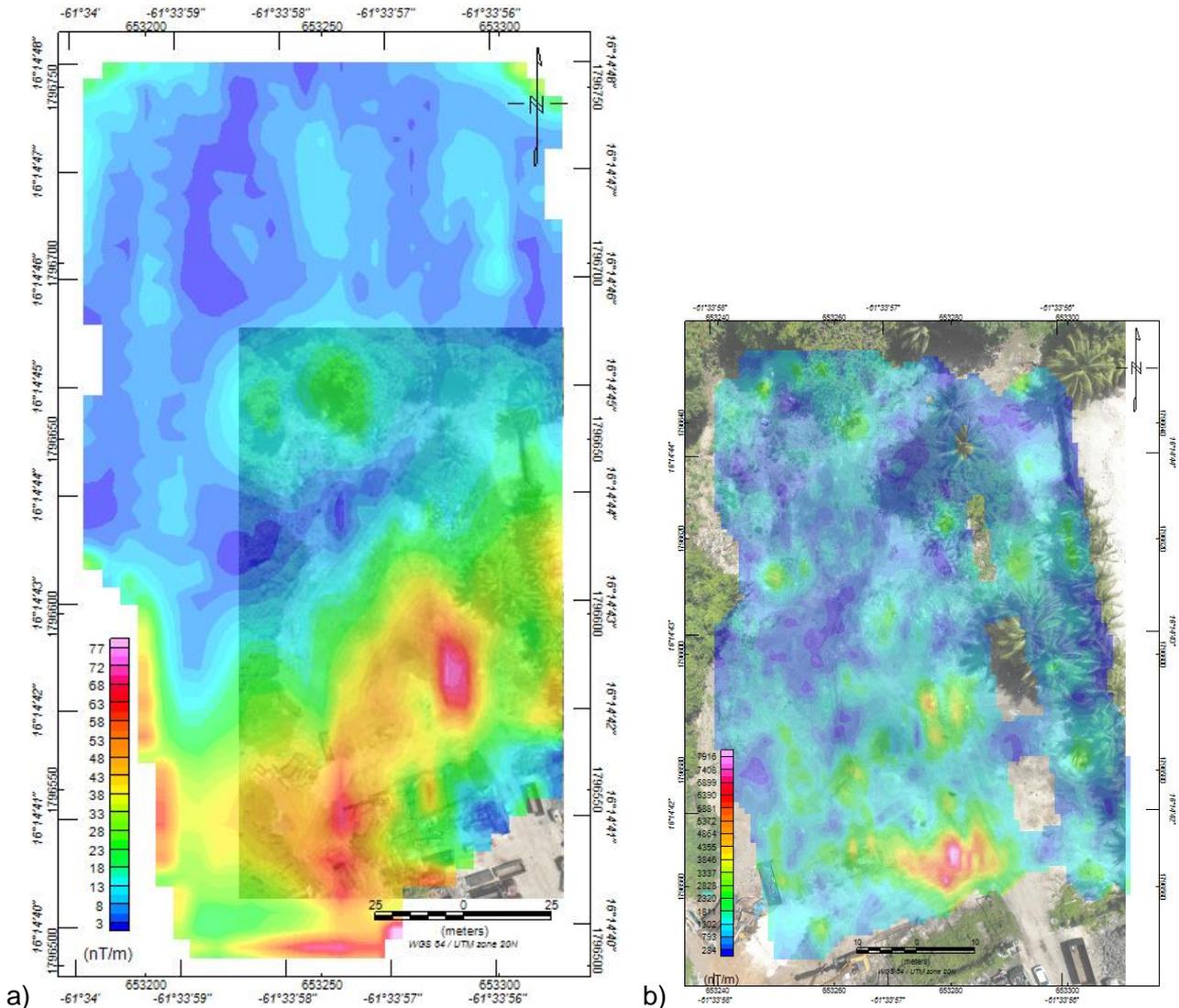


Figure 12 : Signal analytique du champ magnétique, pour les levés par drone, à 30 m de hauteur (à gauche), et à 1,7 m de hauteur (à droite).

4. Interprétation des cartes magnétiques

On rappelle que les deux objectifs principaux de l'étude magnétique étaient :

- de cartographier l'extension des carcasses ou amas de pièces métalliques de voitures en bordure de la partie découverte de la parcelle, dans la zone de mangrove, notamment dans l'extension nord de la parcelle,
- de caractériser le sous-sol de la partie découverte de la parcelle, d'y cartographier la présence de possibles carcasses de voitures et/ou amas métalliques enterrés.

4.1. ANATOMIE DE LA PARCELLE

En surface, la parcelle avait été dégagée de ce qui y était entreposé et d'éventuels débris, la semaine précédant les mesures géophysiques. Le site présentait une morphologie plate et propre (avec quelques débris divers, de petite taille ici et là) (Figure 13). Cette partie dégagée constituait une plateforme s'étendant jusqu'aux limites de la mangrove au nord et à l'ouest/nord-ouest.



Figure 13 : Vues du site d'étude : a) du sud vers le nord, la partie dégagée se terminant dans la mangrove en fond d'image, de l'est vers l'ouest, la partie dégagée se terminant dans la mangrove en fond d'image.

Aux bordures nord et ouest/nord-ouest de la zone dégagée, la plateforme se terminait dans la mangrove, surplombant le pied des arbres de 1,5 à 2 m environ. Dans et au pied du petit talus qui constituait cette bordure, on pouvait observer des débris d'automobiles divers : pneus, capots, pare-brise, pare-chocs, moteurs, etc.(Figure 14).

En complément de ces observations, le gérant de la société de recyclage occupant le terrain d'étude nous a fait part de sa connaissance historique du site, sur lequel il a travaillé depuis 25 ans. Il nous a indiqué que sur cette parcelle, sans préciser de délimitation exacte, il y avait eu, année après année, une succession de séquences d'empilement de carcasses de voitures / d'écrasement par une machine extrêmement lourde, et de nivelage par une fine couche de tuf. Le terme de « lasagne de carcasses de voitures » a été utilisé. Cette lasagne constituée pendant des années se développerait sur 8 à 9 mètres d'épaisseur selon cette personne.

Ce dernier point nous semble sujet à caution, dans la mesure où le niveau de la plateforme actuelle n'est qu'à environ 2 mètres au-dessus de la mangrove environnante. Si ce sont bien 8 à 9 mètres de déchets qui sont entreposés, il faudrait : soit considérer que le site a été creusé avant cet entreposage, soit que le niveau actuel de la mangrove environnante n'est pas le niveau naturel du sol, soit que le sous-sol n'est pas stable et que les carcasses sont sous le niveau actuel du marécage. L'analyse d'un modèle numérique de terrain sur et au pourtour de la parcelle laisse penser que la mangrove environnante est à son niveau naturel : au-delà du ressaut que forme la plateforme, le relief dans la mangrove est plan.



Figure 14 : Débris de véhicules variés observés sur tout le pourtour de la plateforme dégagée et à faible distance dans la mangrove.

4.2. INTERPRETATION CARTOGRAPHIQUE DES DONNEES MAGNETIQUES

Sur la base des cartes magnétiques présentées précédemment et des éléments de contexte du site dont nous disposons, les premiers éléments d'interprétation qui peuvent être formulés sont :

- La partie découverte du site d'étude est globalement très magnétique, avec des variations de plusieurs centaines à milliers de nanoTeslas (selon l'altitude de mesure) : ces amplitudes sont tout à fait inhabituelles, surtout sur une très petite surface. Cela traduit la présence de grandes quantités de matériaux fortement magnétiques en subsurface. Cette première observation paraît en bon accord avec la « lasagne de carcasses de voitures » évoquée par le gérant de la société de recyclage.
- Au premier abord, compte-tenu de l'aspect lisse et propre du site en surface, on se serait attendu à la présence de petites signatures magnétiques ponctuelles sous la plateforme, correspondant à la présence de carcasses ou débris de voitures disséminés. Il est remarquable de noter qu'on n'observe pas, notamment dans le levé de plus haute résolution (Figure 11b, Figure 12b), de signaux locaux (de quelques mètres d'extension) qui pourraient traduire la présence de tels débris dispersés (en sous-sol). Ce type signaux ponctuels liés à des corps métalliques enterrés est très caractéristique et n'est clairement pas observé ici.
En fait, le caractère principalement dipolaire des signaux, leurs grandes dimensions et la forte intensité globale mesurée laisse plutôt penser à une dissémination (ou un amas) quasi-continu de pièces métallique dans le sous-sol, a minima sur l'ensemble de la parcelle découverte. Cette image est cohérente avec la « lasagne de carcasses de voitures ».
- L'intensité du signal magnétique, bien différenciée sur la carte du signal analytique issue du vol à 30 m (Figure 12a) montre clairement trois niveaux de signal différenciés : très fort

au sud de la parcelle, intermédiaire au nord de la zone dégagée, faible plus au nord dans la mangrove. Cette observation s'interprète qualitativement par une plus forte épaisseur (ou densité de débris ferreux) au sud de la parcelle, un contenu ferreux moyen et/ou une épaisseur de débris moins importante dans la partie nord de la plateforme et peu ou pas de débris en direction du nord dans la mangrove.

- A la question de l'extension maximale des débris/carcasses d'automobiles au-delà de la partie découverte du site, dans la mangrove, c'est la carte du signal analytique magnétique établie à 30 m au-dessus du sol de façon continue au-dessus de la zone découverte et sur la mangrove (Figure 12b) qui est la plus parlante. On y observe que l'extension de la zone anormalement magnétique s'étend approximativement jusqu'aux limites de la plateforme découverte.

Cette figure peut être précisée en superposant les contours du signal analytique sur une photo aérienne un peu plus ancienne (récente, mais sans précision de date, issue du Géoportail) (Figure 15a). Sur cette figure, on a également représenté, sous forme de liserés rouges, les zones de pente (également disponibles sur Géoportail).

On constate dans la partie nord-est de la carte (Figure 15a) une bonne correspondance entre la zone de pente (qui marque la limite d'extension de la plateforme sous le couvert végétal) et l'extension des zones de signal analytique élevé. Il est donc logique de penser que les débris métalliques dans cette zone ne dépassent pas la limite marquée dans le relief.

En extrapolant cette observation à partir de la carte magnétique aux parties de la carte où l'information sur la pente n'est pas exploitable (Figure 15a), on parvient à délimiter tout le contours de la zone d'extension maximale probable des débris/carcasses d'automobiles (liseré rouge pointillé).

La superposition de ce liseré rouge sur une autre photo aérienne, datant de la période 2000-2005 (Figure 15b), montre une très bonne correspondance avec les zones découvertes à cette époque – qui paraissent donc, d'après le magnétisme, les limites maximales d'extension de l'activité du garage Laurent.

A la question de la présence ou non de débris de carcasses de voiture sous tout ou partie de la zone découverte – dans l'objectif d'implanter un piézomètre de contrôle de la qualité des eaux sur le site en évitant de forer dans un amas de ferrailles - les deux cartes du signal analytique magnétique produites à 30 m et à 1,7m de hauteur (Figure 12a et b) amènent une information cohérente. Toutes deux révèlent la présence d'un « couloir » relativement moins magnétique orienté SO-NE, qui sépare la zone très magnétique au sud de la zone moyennement magnétique au nord-ouest de la plateforme. Sur la Figure 15, on observe que ce « couloir » semble avoir été une zone de transition entre 2 parties du site : avec un entreposage de voitures massif au sud et plus sporadique dans la partie NO de la plateforme. Cette observation est cohérente avec les intensités magnétiques différenciées entre les deux zones. Sur les deux photographies aériennes de la Figure 15, peu de voitures paraissent avoir été entreposées le long du couloir peu magnétique, dont l'extrémité sud-ouest a été occupée par un bâtiment (Figure 15a).

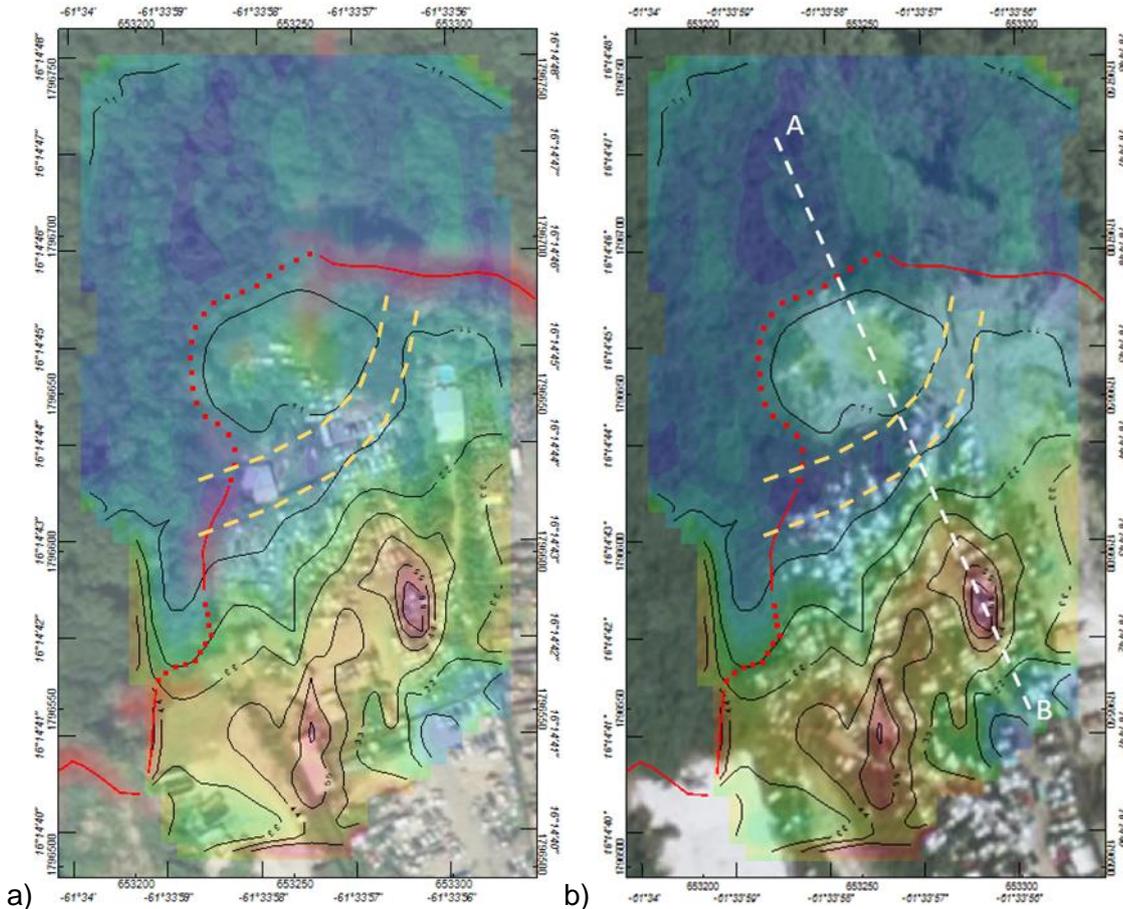


Figure 15 : Carte du signal analytique magnétique (en dégradés de couleur et isocontours) superposée à des photographies aériennes de l'IGN : « récente » à gauche, datant de 2000-2005 à droite. Sur les deux photographies, les petites taches blanches sont des voitures entreposées. L'analyse croisée de ces informations est fournie dans le texte ; le liseré rouge constitue la limite d'extension maximale des débris et carcasses de voitures, interprétée par recoupement des données magnétiques et photo. Les deux tiretés jaunes soulignent un « couloir » relativement peu magnétique entre deux parties de la plateforme. La ligne blanche localise le profil magnétique modélisé.

4.3. ORDRE DE GRANDEUR DE L'ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS MÉTALLIQUES PAR MODÉLISATION DES DONNÉES MAGNÉTIQUES

Afin de proposer une évaluation de l'épaisseur d'accumulation des carcasses et débris métallique de voitures entreposés sur le site couvert par nos levés magnétiques, une modélisation préliminaire a été tentée.

Cette modélisation ne peut-être qu'indicative dans la mesure où les caractéristiques magnétiques des matériaux entreposés ne sont pas connues : elles ont été estimées à partir de valeurs trouvées dans la littérature qui ont été affinées au travers du processus de modélisation. On a pu voir précédemment que les signaux magnétiques sur le site ont une source de nature principalement rémanente. En accord avec des valeurs issues de l'industrie sidérurgique, une aimantation de 20 A/m a été utilisée, un peu inférieure à l'aimantation des aciers, en considérant que les dépôts sur le site ne sont pas entièrement ferreux, contenant également du caoutchouc, du plastique, etc. l'ensemble étant « emballé » dans du tuf calcaire. Cette valeur d'aimantation des dépôts est compatible avec l'amplitude des signaux magnétiques mesurés, mais reste

cependant largement discutable en l'absence de déterminations effectives sur le site. Il faut également noter que la modélisation est fortement impactée par cette valeur d'aimantation puisque le signal magnétique résulte du produit de cette aimantation par l'épaisseur du dépôt. Autrement dit, dans l'hypothèse où les dépôts seraient 2 fois plus magnétiques que ce qui a été considéré, l'épaisseur en serait divisée par deux – et inversement.

Il est à noter tout de même que cette valeur d'aimantation permet d'ajuster de façon satisfaisante le champ magnétique mesuré à l'extrémité NO de la plateforme en considérant que l'épaisseur de dépôt est celle de la plateforme, observée sur le terrain (environ 2 m), ce qui est une hypothèse qui nous a semblé réaliste.

L'emplacement et la géométrie en sous-sol des zones de dépôt modélisées sont déterminés en ajustant la géométrie du modèle de façon à ce que son effet magnétique corresponde au champ magnétique mesuré. On a modélisé la carte magnétique mesurée à 30m de hauteur réduite au pôle et l'aimantation des dépôts métalliques a été considérée verticale, ce qui était l'hypothèse la plus simple et s'est révélé pertinent pour reproduire le signal magnétique mesuré en localisant les dépôts à l'aplomb des zones où des voitures apparaissent entreposées sur les photographies aériennes.

La position du profil magnétique AB modélisé est localisée [Figure 15b](#) : le profil recoupe les 3 principaux domaines magnétiques depuis la mangrove au nord jusqu'à la zone très magnétique au sud du site, en recoupant le couloir peu magnétique orienté SO-NE identifié précédemment. Ces différentes zones caractéristiques d'un point de vue magnétique se traduisent dans le modèle ([Figure 16](#)) de la façon suivante :

- A gauche de la coupe, dans la mangrove, l'aimantation du sous-sol est considérée comme nulle : en réalité c'est une approximation, justifiée par le fait que les dépôts ferreux sont, en relatif, très fortement aimantés par rapport au sous-sol naturel de la mangrove.
- En allant vers la droite (coordonnées X de la coupe 50 à 100 environ), le petit ressaut topographique (de 2 m) marque le bord de la plateforme découverte. La couche grise sous l'extrémité de la plateforme figure un dépôt métallique de 2 mètres d'épaisseur. Il permet d'ajuster de façon satisfaisante le signal magnétique mesuré.
- Au centre du profil (coordonnées X de la coupe 100 à 120 environ), une interruption du dépôt métallique permet d'ajuster la petite remontée du signal magnétique. Cette zone correspond au couloir SO-NE le long duquel il avait été interprété en carte comme peu ou pas affecté par des dépôts métalliques. Cela est confirmé par la modélisation.
- Plus à droite du profil (coordonnées X de la coupe 120 à 170 environ), le modèle suggère un épaississement des dépôts métalliques, sur une épaisseur maximale de 6 m environ. Ce dépôt semble circonscrit au nord de la barrière sud de la parcelle. Cependant le levé n'a pas pu être étendu sur la parcelle contiguë au sud (qui était en activité) et on ne peut donc rien conclure sur le sous-sol au sud de la barrière.
- L'ajustement imparfait du modèle à son extrémité sud (coordonnées X de la coupe supérieure à 170) est largement dû au fait que le modèle n'est pas contraint au-delà du mur sud de la parcelle.

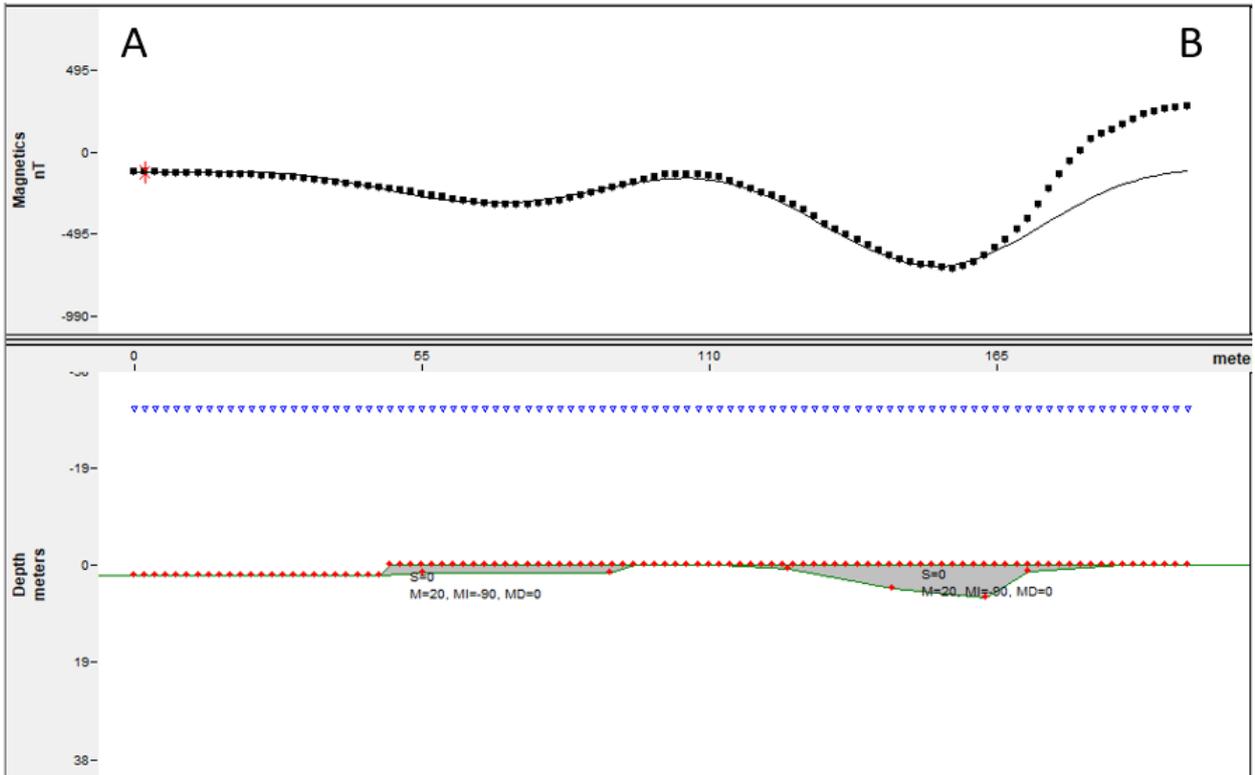


Figure 16 : Profil magnétique modélisé le long de la coupe AB, localisée en [Figure 15b](#). La fenêtre du bas présente la géométrie modélisée des dépôts métalliques ; leur effet magnétique est représenté par la ligne continue dans la fenêtre du haut, qui doit être ajustée aux données mesurées (points dans la fenêtre du haut). On se reportera au texte pour le commentaire du modèle.

5. Conclusions

Sur la parcelle de l'ancien garage Laurent à Jarry et dans la mangrove environnante, en vue de caractériser en sous-sol la présence de carcasses de voitures et débris métalliques, un levé magnétique a été mis en œuvre par le BRGM.

Ce levé, réalisé à l'aide d'un magnétomètre de type fluxgate embarqué sur un drone semi-léger Mavic 3 a permis en quelques heures de couvrir le site à haute résolution sur la partie dégagée de la parcelle (par un vol à 1,7m de hauteur) et à plus basse résolution, par un vol à 30 m de hauteur, au-dessus de la parcelle découverte et de la mangrove environnante. Pendant ces vols, une station de base magnétique avait été installée au sol, permettant de corriger les variations temporelles du champ magnétique.

Le traitement des données acquises a permis de produire deux cartes magnétiques de la zone, complémentaires par leur résolution et leur extension, ainsi qu'une coupe magnétique modélisée simplifiée.

L'interprétation de ces cartes et coupe, au regard de photographies aériennes, complétées de données sur le relief et d'informations sur l'histoire du site recueillies auprès d'un témoin ayant travaillé de longue date sur le site, ont permis :

- 1- De délimiter l'extension de la zone des dépôts/enfouissement de VHU dans la mangrove, cohérente avec l'information recueillie dans des photographies aériennes remontant jusqu'aux années 2000,
- 2- De caractériser l'extension en carte et une estimation de l'épaisseur, en coupe, de deux zones principales d'enfouissement de VHU, séparées par un couloir recoupant la parcelle suivant une direction SO-NE qui paraît remblayé essentiellement de tufs calcaires.

6. Bibliographie

Olsen, N., Clausen, L. T., Sabaka, T. J., Brauer, P., Merayo, J. M., Jørgensen, J. L., ... & Risbo, T. (2003). Calibration of the Ørsted vector magnetometer. *Earth, planets and space*, 55(1), 11-18.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

Direction régionale ou UTAM

Adresse

Tél. :

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm