



HAL
open science

**Méthode magnétique multi-échelle à trois dimensions
appliquée à l'étude archéologique du site de Qasr
'Allam, oasis de Bahariya, Egypte**

Bruno Gavazzi

► **To cite this version:**

Bruno Gavazzi. Méthode magnétique multi-échelle à trois dimensions appliquée à l'étude archéologique du site de Qasr 'Allam, oasis de Bahariya, Egypte. Archéologie et Préhistoire. Université de Strasbourg, 2015. Français. NNT : 2015STRAG029 . tel-01321216

HAL Id: tel-01321216

<https://theses.hal.science/tel-01321216>

Submitted on 25 May 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉCOLE DOCTORALE 519

UMR 7044 – UMR 7516

THÈSE présentée par :

Bruno GAVAZZI

soutenue le : 02 juillet 2015

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université de Strasbourg**

Discipline/ Spécialité : Géophysique et archéologie

**Méthode magnétique multi-échelle à
trois dimensions appliquée à l'étude
archéologique du site de *Qasr 'Allam*,
oasis de *Bahariya*, Égypte**

THÈSE dirigée par :

M. COLIN Frédéric
M. MUNSCHY Marc

Professeur, Université de Strasbourg
Physicien des observatoires, Université de Strasbourg

RAPPORTEURS :

Mme CASTEL-NOGRETTE Corinne Chargée de recherche, Université de Lyon 2
M. THEBAULT Erwan Chargé de recherche, Université de Nantes

AUTRES MEMBRES DU JURY :

M. GALLET Yves
M. QUENET Philippe

Directeur de recherche, Institut de Physique du Globe de Paris
Maître de conférences, Université de Strasbourg

Avant-propos

Ce document constitue le manuscrit de la thèse intitulée *Méthode magnétique multi-échelle à trois dimensions appliquée à l'étude archéologique de Qasr 'Allam, oasis de Bahariya, Égypte*, soutenue le 2 juillet 2015.

Ce travail n'aurait pas été possible sans le financement durant trois ans par un contrat doctoral du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche fléché sur les travaux de l'Institut Français d'Archéologie Orientale, puis pour quelques mois par l'université de Strasbourg au sein du projet d'Initiatives D'EXcellence intitulé « Autour des points d'eau. Expansions et régressions d'un terroir irrigué de l'Oasis de Bahariya (Égypte), des pharaons à nos jours. ».

Pour simplifier la lecture, une liste des variables utilisées au cours de l'étude est présentée en annexe A, page 163. Concernant les figures, références et crédits photographiques sont indiqués dans chaque légende.

Remerciements

À l'heure de finaliser ce manuscrit, il m'est agréable de repenser à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à son élaboration.

J'aimerais tout d'abord remercier mes deux directeurs, Frédéric Colin et Marc Munsch, pour avoir eu confiance dans mon travail. Leur disponibilité et leur enthousiasme m'ont toujours accompagné au cours de ces trois

(presque quatre) dernières années. Nos différentes discussions ont été une source précieuse d'informations et de conseils sans lesquels cette thèse n'aurait probablement pas vu le jour.

Je tiens également à remercier les autres membres de mon jury : Corinne Castel, Yves Gallet, Philippe Quenet et Erwan Thébault, qui ont accepté de juger mon travail. Leurs remarques et conseils m'ont aidé à améliorer grandement la qualité du manuscrit.

Je porte aussi une grande reconnaissance à tous les membres de la mission *Bahariya*. La paire de « brouteurs d'herbe », Mathieu Schuster et Dominique Schwartz, mine d'information sur les paléoenvironnements et les lacs perdus au noms douteux. Catherine Duvette, qui en plus de relever tous les recoins du site, s'est révélée indispensable à l'organisation des missions. Un nombre important de plans architecturaux de cette thèse sont d'ailleurs le fruit de son travail. Aurélie, Cassandre, Christophe et Johan, compagnons de fouille et toujours prêts à explorer l'oasis. Frédéric et Yvanna, les deux « croques-mort », pour toutes ces discussions fascinantes sur les trucs décédés, les grandes guerres et l'importation probable de figurines chinoises en plastique en Égypte antique. Rozan et Simon, géophysiciens, dont l'aide a été précieuse pour l'acquisition des données, mais également pour m'avoir grandement informé sur la culture syrienne et sur l'art de s'endormir en milieu hostile. Tous les membres de l'IFAO, français et égyptiens, qui ont participé à ces missions et qui se reconnaîtront. Et bien entendu, je suis très redevable envers les équipes du contremaître Sayed, qui ont toujours accepté d'évacuer des tonnes de sable pendant des semaines et des semaines en ayant (plus ou moins) confiance envers mes prédictions. Finalement, je suis également très reconnaissant envers le sang froid des trois militaires nous ayant poursuivis dans le désert sans nous tirer dessus.

Une part non négligeable des compétences et connaissances développées dans ce travail sont issues d'autres expériences de terrain que j'ai eu la chance de réaliser au cours de cette thèse, tout d'abord à Dachstein avec Grégory

Oswald, puis en Arabie Saoudite avec Jérémie Schiettecatte et toute son équipe, un grand merci à eux pour ces opportunités.

Il m'est également agréable de repenser aux collègues du laboratoire et amis pour la bonne ambiance de travail, depuis le début avec Benoît, Émilie, Isabelle, Morgane et Victor, puis plus tardivement Jeanne, Marie-Éva, Médéric, Michael, Pauline, Pierre et tous ceux que j'oublie au moment où j'écris ces mots. J'aimerais remercier également Tobias, sans qui je n'aurais pas à raconter toutes ces histoires d'aventures ou rien ne se passe comme prévu .

Un grand merci à ma famille, pour leur soutien au cours de tout mon parcours scolaire et professionnel, et particulièrement ma mère, qui a accepté de relire ce manuscrit, sûrement obscur pour elle, afin d'en expurger les fautes disgracieuses.

Enfin, un grand merci à ma femme, Michaela, qui en plus d'un soutien sans faille a su me stimuler dans les moments où je n'avançais pas.

Table des matières

Introduction	11
1 Contextes de l'étude et problématiques	17
1.1 Géographie et géologie	19
1.1.1 Localisation	19
1.1.2 Formation et géologie de l'oasis	21
1.1.3 Climat et ressource en eau	23
1.2 Archéologie	24
1.2.1 <i>Qasr 'Allam</i>	26
1.2.1.1 Système d'irrigation	26
1.2.1.2 Bâti	28
1.2.1.3 Menace du site	30
1.2.2 Problématiques	32
1.3 Géophysique	32
1.3.1 Les différents types de capteurs	33
1.3.1.1 Magnétomètres scalaires	34
1.3.1.2 Magnétomètres vectoriels	36
1.3.2 Les différents modes d'acquisition	38
1.3.2.1 Gradiométrie	38
1.3.2.2 Mesure du champ total	40
1.4 Approche proposée et problématiques	40
2 Quelques éléments de magnétisme	43
2.1 Historique de l'étude du magnétisme	45
2.2 Dipôles et champs magnétiques	47
2.2.1 Définitions	47
2.2.2 Propriétés des champs magnétiques	48
2.3 Propriétés magnétiques des matériaux	49
2.3.1 Matériaux diamagnétiques	50
2.3.2 Matériaux paramagnétiques	50
2.3.3 Matériaux ferromagnétiques (sens large)	51

2.4	Le champ magnétique terrestre	52
2.4.1	Définitions	52
2.4.2	Les différentes contributions au champ	54
2.5	Les anomalies magnétiques	55
2.5.1	Anomalie vectorielle	55
2.5.2	Anomalie de l'intensité du champ magnétique	56
2.5.3	Approximation de l'anomalie	58
2.5.4	Discussion sur la validité de l'approximation de l'anomalie	58
3	Théorie du potentiel pour l'interprétation	61
3.1	Interprétation des données magnétiques	63
3.1.1	L'anomalie magnétique	63
3.1.2	Les différents types de méthodes	64
3.2	Définitions mathématiques	66
3.2.1	Système de référence	66
3.2.2	Domaine spectral	66
3.2.2.1	Définition	66
3.2.2.2	Transformée de Fourier	67
3.2.2.3	Transformée de Fourier discrète	68
3.2.2.4	Transformée de Fourier et laplacien nul	69
3.3	Modélisation	70
3.3.1	Modèle à deux dimensions	70
3.3.1.1	Calcul du potentiel	71
3.3.1.2	Calcul du champ	72
3.3.1.3	Calcul de l'anomalie	73
3.3.2	Modèle à trois dimensions	74
3.3.2.1	Calcul du potentiel	74
3.3.2.2	Calcul du champ	75
3.3.2.3	Calcul de l'anomalie	75
3.3.2.4	Volume spectral	75
3.3.2.5	Somme de dipôles	76
3.4	Inversion	78
3.4.1	Problèmes linéaires	78
3.4.2	Problèmes non-linéaires	79
3.5	Opérateurs de transformation	80
3.5.1	Prolongement	80
3.5.2	Dérivées directionnelles	81
3.5.3	Double réduction au pôle	83
3.5.4	Signal analytique - Gradient total	84
3.5.4.1	Sources à deux dimensions	84

3.5.4.2	Facteur de forme	87
3.5.4.3	Sources à trois dimensions	89
3.5.5	<i>Tilt angle</i>	90
3.5.5.1	Sources à deux dimensions	91
3.5.5.2	Sources à trois dimensions	93
4	La prospection magnétique	95
4.1	Mise en Œuvre	97
4.1.1	Dispositifs	97
4.1.1.1	Électronique centrale	98
4.1.1.2	Dispositif à capteurs portés	99
4.1.1.3	Dispositif à capteurs traînés	101
4.1.1.4	Dispositif pour parois verticales	102
4.1.2	Traitement des données	102
4.1.2.1	Étalonnage et compensation	103
4.1.2.2	Correction de la dérive temporelle	105
4.1.2.3	Calcul de l'anomalie	106
4.1.2.4	Calcul de la grille d'anomalie	107
4.1.2.5	Représentation de la grille	108
4.2	Acquisition	109
4.2.1	Étalonnage	110
4.2.2	Correction de la dérive temporelle	112
4.2.3	Calcul de l'anomalie	113
4.2.4	Positionnement	115
4.2.5	Égalisation sur grille	115
4.3	Résultats	116
4.3.1	Cartes d'anomalies	116
4.3.1.1	Dispositif à capteurs portés	116
4.3.1.2	Dispositif à capteurs traînés	120
4.3.2	Comparatif	120
5	Les sources d'anomalie	125
5.1	Étude multi-échelle	127
5.1.1	Dispositif à capteurs portés	127
5.1.1.1	Anomalies ponctuelles	127
5.1.1.2	Gradient Nord - Sud	129
5.1.1.3	Linéations	130
5.1.2	Dispositif à capteurs traînés	134
5.2	Études détaillées	137
5.2.1	Zone 1	137
5.2.2	Zone 2	140

5.2.3 Zone 3	148
5.3 Mesures sur échantillons	152
5.4 Interprétation générale du site	154
Conclusion générale et perspectives	157
Appendices	161
A Liste des variables utilisées	163
B Fiche technique <i>Bartington Mag-03</i>	167
C Comprendre <i>gridfit</i>	181
D Gavazzi <i>et al.</i>	189
Bibliographie	219

Introduction

Cette étude part d'un constat simple : les sources archéologiques consistent très souvent en des structures partiellement ou complètement enfouies. C'est donc tout naturellement que les méthodes géophysiques d'investigation du sous-sol sont aujourd'hui de plus en plus utilisées par les archéologues. Les résultats sont néanmoins pour la plupart du temps limités à la production de cartes ou de coupes verticales acquises soit à l'aide de dispositifs clés en main, soit à la suite d'offres de prestation. Ce travail de thèse propose d'aller plus loin, en liant plus intimement l'archéologie et la géophysique sur le site de *Qasr 'Allam à Bahariya*, oasis du désert occidental égyptien. L'approche consiste à développer des méthodes magnétiques qui, couplées à des fouilles ciblées, permettent de répondre à la fois aux questions archéologiques et aux problématiques géophysiques qu'elles soulèvent. Pour cela, l'étude est divisée en cinq chapitres : **contextes de l'étude et problématiques** (Chapitre 1), **quelques éléments de magnétisme** (Chapitre 2), **théorie du potentiel pour l'interprétation** (Chapitre 3), **la prospection magnétique** (Chapitre 4) et **les sources d'anomalie** (Chapitre 5).

Le premier chapitre, qui vise à présenter les différents contextes et problématiques de l'étude, est divisé en trois parties. La première concerne les contextes géographiques et géologiques. La localisation de la zone d'étude dans le désert occidental égyptien est tout d'abord établie. L'histoire de formation de l'oasis, à l'origine de sa morphologie particulière, est ensuite décrite. Le contraste environnemental avec le glacis désertique l'entourant, notamment au niveau de la ressource en eau, est finalement abordé. La deuxième partie concerne le contexte archéologique particulier du site de

Qasr 'Allam. Ce dernier présente en effet des vestiges importants pour la compréhension de deux aspects du paysage ancien de l'oasis, à savoir un vaste système d'irrigation et un ensemble bâti ayant connu plusieurs périodes d'occupation. Une partie importante de ces structures se trouve aujourd'hui recouverte par les sédiments et ainsi invisible en surface. Le site fait également face à une menace grandissante de destruction par la progression de l'urbanisation et des terrains agricoles aux alentours. De ces conditions, différentes contraintes techniques à l'étude archéologique du site sont identifiées. La troisième partie présente le cheminement amenant au choix de la mesure géophysique la plus adaptée. Une première discussion est tout d'abord faite entre méthode sismique, électrique, électro-magnétique, géo-radar, gravimétrique et magnétique. Ensuite, un choix est fait entre les différents types de capteurs et modes d'acquisition. Enfin, les nouvelles problématiques soulevées par ce choix sont définies.

Le deuxième chapitre, qui vise à présenter les bases nécessaires à la compréhension de la méthode proposée, est divisé en cinq parties. La première décrit un bref historique des connaissances sur la question, en partant des premières mentions du magnétisme jusqu'aux prospections actuelles. La deuxième partie présente les concepts et propriétés des dipôles et champs magnétiques associés. Le moment magnétique dipolaire, le potentiel et son laplacien sont également définis. La troisième partie concerne les propriétés magnétiques des matériaux. Les concepts d'aimantation induite et rémanente, de susceptibilité magnétique et de comportement diamagnétique, paramagnétique et ferromagnétique au sens large sont expliqués. La quatrième partie aborde les propriétés du champ magnétique terrestre. L'inclinaison et la déclinaison y sont définies ainsi que les différentes sources du champ mesuré en surface. Les contributions de ces dernières à l'intensité du champ magnétique sont comparées avec celle d'une source d'origine archéologique que l'on définit alors comme une anomalie. La cinquième partie présente le concept fondamental d'anomalie magnétique. L'anomalie vectorielle est tout d'abord définie. Cette dernière n'étant pas précisément mesurable en surface dans les conditions de prospection, l'anomalie de l'intensité du champ magnétique est introduite.

Son approximation comme sa projection sur le champ régional, importante pour l'utilisation de la théorie du potentiel dans les chapitres suivants, est décrite. La validité de cette approximation est ensuite discutée pour des sources archéologiques.

Le troisième chapitre, qui vise à présenter différentes méthodes d'interprétation des anomalies magnétiques issues de la théorie du potentiel pour une application dans le cadre de l'étude, et, plus généralement, dans des contextes archéologiques, est divisé en cinq parties. La première énonce les limites de l'interprétation directement à partir des anomalies magnétiques et définit les différents types de méthodes d'interprétation que sont le problème direct, le problème inverse et les opérateurs de transformation. La deuxième partie aborde les différentes définitions mathématiques nécessaires à la suite de l'étude, à savoir le système de référence et le domaine spectral. La troisième partie présente la modélisation en séparant sources à deux et trois dimensions. Les calculs du potentiel, du champ et de l'anomalie de telles structures sont donnés. Afin de modéliser des structures complexes rapidement, il est ensuite proposé de faire l'approximation d'un prisme droit par un dipôle unique placé en son centre. L'étude d'un cas synthétique permet de définir une distance d'observation seuil, en fonction de la largeur du prisme, à partir de laquelle cette approximation est considérée comme bonne. La quatrième partie décrit la technique d'inversion utilisée dans l'étude. Les problèmes, le plus souvent surdéterminés, peuvent être résolus à l'aide de la méthode des moindres-carrés dont l'application est présentée, tout d'abord pour les problèmes linéaires, et ensuite pour les problèmes non-linéaires. La cinquième partie présente les différents opérateurs de transformation utilisés dans l'étude : prolongement, dérivées directionnelles, simple et double réduction au pôle, signal analytique et *tilt angle*. Ces deux derniers sont étudiés plus en détails. Un facteur de forme est proposé pour le signal analytique 2D et l'impact de la géométrie sur le *tilt* est discuté.

Le quatrième chapitre, qui vise à présenter le processus complet permettant de passer du concept théorique proposé à l'obtention de cartes d'anomalies,

est divisé en trois parties. La première concerne la mise en œuvre de l'idée de base. Trois dispositifs développés pour l'étude sont tout d'abord décrits : le dispositif à capteurs portés, qui permet une acquisition rapide et pratique, le dispositif à capteurs traînés, qui permet d'obtenir une précision plus grande au prix de la vitesse, et enfin le dispositif pour paroi qui permet l'acquisition dans le plan vertical après la fouille archéologique. Tous ces appareils s'articulent autour de deux générations successives d'une même électronique centrale développée parallèlement à ainsi qu'au cours de l'étude. Les différents traitements du signal à appliquer aux données brutes sont ensuite présentés, à savoir l'étalonnage et la compensation, la correction des variations temporelles, le calcul de l'anomalie et celui de la grille d'anomalie. La deuxième partie concerne l'acquisition à proprement parler et l'application des traitements dans la pratique. Ainsi les effets de l'étalonnage, de la correction des variations temporelles et du calcul de l'anomalie sont présentés pour un jeu de données mesuré sur place. Les problèmes de positionnement dus à la dérive et à des sauts du signal *GPS* sont également évoqués et une méthode d'égalisation sur grille pour limiter leurs effets est proposée. La troisième partie présente les résultats de la prospection. Les cartographies générales de l'anomalie sont tout d'abord décrites et analysées, et les anomalies classées en plusieurs catégories. Les cartes d'une zone test obtenues à l'aide des dispositifs à capteurs portés et traînés ainsi qu'à l'aide d'un gradiomètre vectoriel sont également étudiés afin de comparer les résultats dans la pratique entre les prototypes mis en place dans le cadre de l'étude et le matériel habituellement utilisé en archéologie.

Le cinquième et dernier chapitre, qui vise à présenter l'interprétation des sources d'anomalies, est divisé en quatre parties. La première passe en revue les différents types d'anomalie définis dans le chapitre précédent à l'aide d'opérateurs de transformation, afin de donner une première analyse spatiale. Des zones ciblées sont ensuite définies pour une étude plus poussée. La deuxième partie présente l'étude détaillée de ces zones où différents type d'anomalies sont présents. Les résultats des fouilles ainsi conduites sont comparés à la fois à des résultats d'inversion et de modélisation et aux mesures

sur parois pour étudier l'origine des anomalies. La troisième partie apporte des données complémentaires sur échantillons de sédiments et différents matériaux de construction afin de présenter, dans la quatrième partie, une interprétation générale du site à la lumière de tous les résultats obtenus.

Chapitre 1

Contextes de l'étude et problématiques

Sommaire

1.1	Géographie et géologie	19
1.1.1	Localisation	19
1.1.2	Formation et géologie de l'oasis	21
1.1.3	Climat et ressource en eau	23
1.2	Archéologie	24
1.2.1	<i>Qasr 'Allam</i>	26
1.2.1.1	Système d'irrigation	26
1.2.1.2	Bâti	28
1.2.1.3	Menace du site	30
1.2.2	Problématiques	32
1.3	Géophysique	32
1.3.1	Les différents types de capteurs	33
1.3.1.1	Magnétomètres scalaires	34
1.3.1.2	Magnétomètres vectoriels	36
1.3.2	Les différents modes d'acquisition	38
1.3.2.1	Gradiométrie	38
1.3.2.2	Mesure du champ total	40
1.4	Approche proposée et problématiques	40

Chapitre 1 : Contextes de l'étude et problématiques

Le but de ce premier chapitre est de présenter les différents contextes et problématiques de l'étude. Le propos est divisé en trois parties. La première présente la localisation de la zone d'étude, l'histoire de sa formation ainsi que ses conditions environnementales (section 1.1). La deuxième aborde le contexte archéologique particulier du site de *Qasr 'Allam* et les problématiques qui en découlent (section 1.2). La dernière partie consiste en une discussion sur le choix de la méthode d'investigation la plus appropriée et des problèmes à résoudre (section 1.3).

1.1 Géographie et géologie

1.1.1 Localisation

L'étude prend place dans l'oasis de *Bahariya* (Figure 1.1), de son nom complet *al wahat al Bahariya*, « les oasis du nord » en arabe¹. En effet, la zone correspond à une large dépression parsemée de rares palmeraies. Située 180 km à l'ouest de la vallée du Nil et 300 km au sud-ouest du Caire, elle est la plus nordique des quatre grandes oasis du désert occidental égyptien qui forment un alignement parallèle à la vallée du Nil : *Bahariya*, *Farafra*, *Dakhla* et *Kharga*. La zone d'étude est également située à mi-chemin entre l'oasis de *Siwa*, près de la frontière Libyenne, et la vallée du Nil. Contrairement aux autres oasis citées, la dépression de *Bahariya* est complètement entourée par des falaises. Cette singularité morphologique s'explique par un contexte de formation bien particulier.

1. Colin & Labrique (2001, p. 159), littéralement « les oasis marines » ou « de la mer », expression que les égyptiens utilisent allégoriquement pour indiquer le nord.

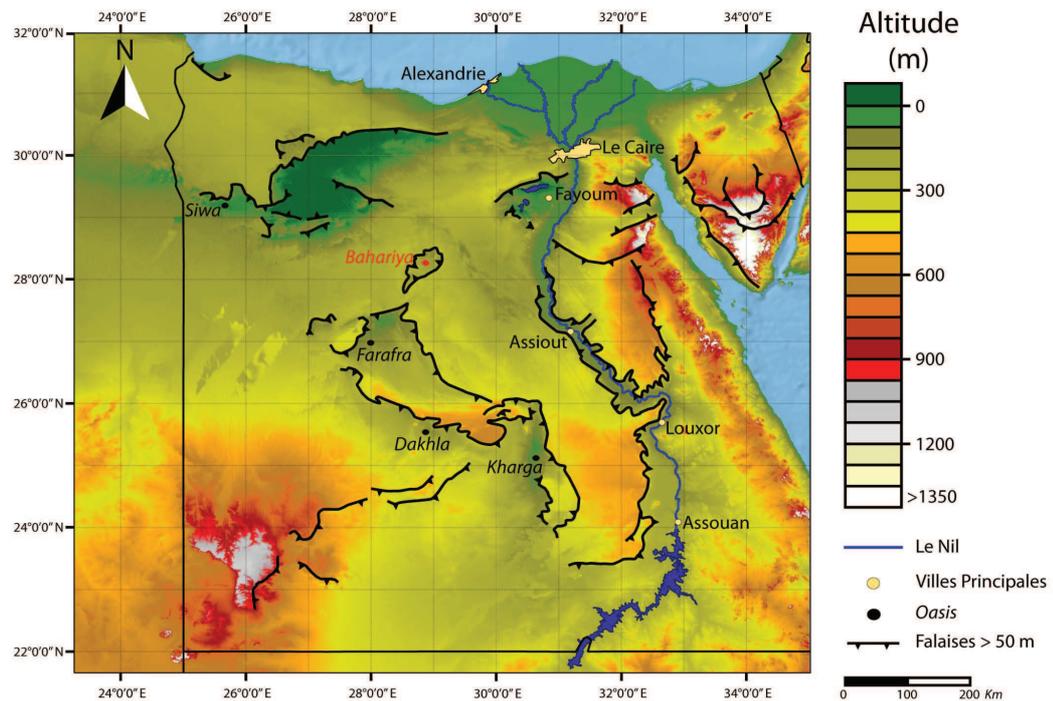


Figure 1.1 – Carte topographique de l'Égypte montrant les principales agglomérations actuelles et les grandes oasis du désert occidental égyptien. L'oasis de Bahariya est indiquée en rouge. Topographie à partir de données SRTM 90 mises à disposition par l'International Center For Tropical Agriculture (CIAT) et disponibles sur <http://srtm.csi.cgiar.org> (Reuter et al. 2007). Cartographie des lieux et des falaises à partir de données GTOPO 30 corrigées à l'aide d'images Landsat (Kindermann et al. 2006, p. 1620, Figure 1).

1.1.2 Formation et géologie de l'oasis

Structurellement, l'Égypte se divise en trois parties² (Figure 1.2).

- Le **nucléus cristallin** au sud et à l'est est composé de roches formées par accréation d'arcs volcaniques au cours du Précambrien³. La zone comprend les principaux massifs égyptiens.
- Le **plateau stable** dans la partie centrale est composé de séquences sédimentaires sur la base cristalline. Ces dernières sont tout d'abord constituées de dépôts clastiques issus du démantèlement des hauteurs de l'arc volcanique cité précédemment, sur une période s'étalant du Cambrien au Crétacé⁴. Ensuite, on assiste à une sédimentation calcaire associée à des séquences de transgressions et régressions marines massives au cours du Paléogène⁵. Peu de déformations tectoniques et une très faible subsidence ont conduit à une répartition sédimentaire homogène et une topographie relativement plane avec des dépressions peu profondes et ouvertes, formées par une érosion éolienne débutant au Miocène⁶, comme les oasis de *Farafra*, *Dakhla* et *Kharga*.
- Le **plateau instable** dans la partie la plus au Nord est composé des mêmes matériaux que le plateau stable mais a subi une forte subsidence et de nombreuses déformations sous l'influence de différents éléments tectoniques, notamment de l'ouverture et fermeture de la Thetys au cours du Jurassique et du Crétacé⁷. Il en résulte une topographie plus accidentée avec des dépressions profondes comme celles de *Bahariya* ou de *Siwa*.

Ce contexte structurel a joué un rôle majeur dans la géologie et la morphologie de l'oasis. La dépression correspond à une ouverture à travers la couche

2. Division proposée par Saïd en 1962 et largement utilisée aujourd'hui, par exemple Meshref (1990) ou Youssef (2003).

3. Le précambrien correspond à la période antérieure à 542 millions d'années (Ma). Les roches les plus anciennes d'Égypte ayant pu être datées sont de la fin de l'Archéen (2673 ± 21 Ma).

4. Le Cambrien débute il y a 542 Ma tandis que le Crétacé se termine il y a 65 Ma.

5. Le Paléogène correspond à la période d'il y a 65 à 23 Ma.

6. Le Miocène débute il y a 23 Ma.

7. Le Jurassique débute il y a 200 Ma tandis que le Crétacé se termine il y a 65 Ma.

supérieure de calcaire marin du Paléogène, le long de l'axe d'un pli anticlinal affectant les couches sous-jacentes. La base de la dépression et la plupart des reliefs sont ainsi constitués de dépôts clastiques (grès et bancs argileux) du Crétacé supérieur ayant subi une forte déformation tectonique probablement liée à la fermeture de la Thétys (Figure 1.3). Ces dépôts font partie de l'ensemble plus large des grès nubiens qui contient l'une des plus grandes réserves d'eau souterraine au monde à travers un réseau d'aquifères interconnectés⁸. Cette caractéristique fait de la dépression une zone où l'accès à la ressource en eau contraste fortement avec la situation du plateau désertique l'entourant.

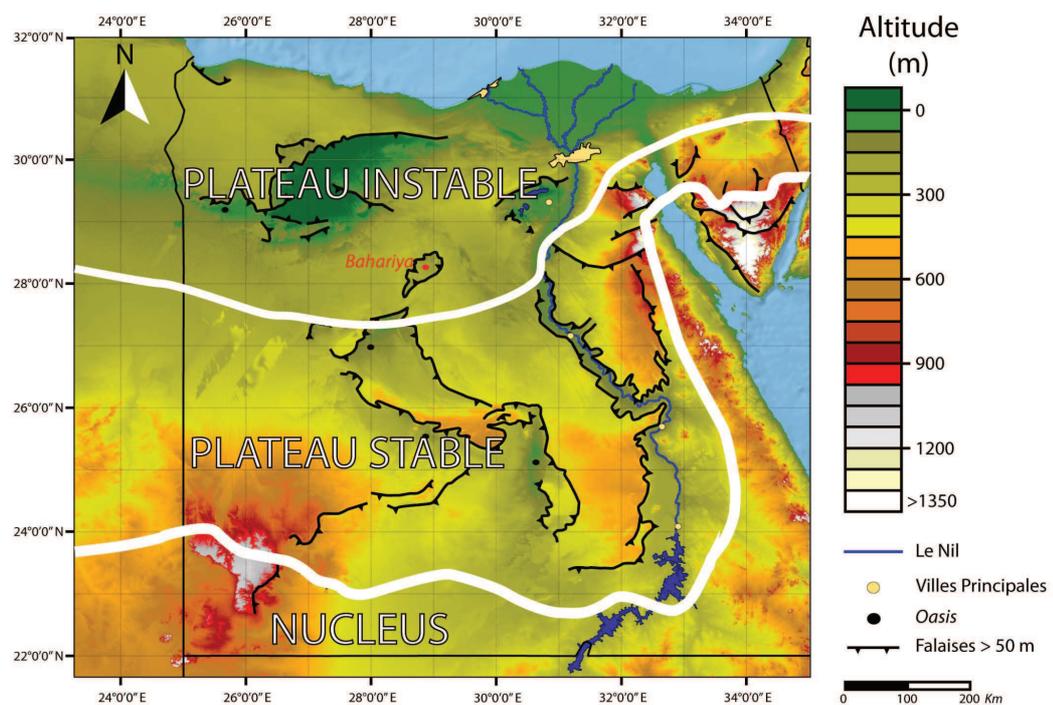


Figure 1.2 – Division structurelle de l'Égypte d'après Said (Meshref 1990) sur le fond topographique de la figure 1.1 (p. 20). Bahariya se trouve au niveau de la marge Sud du plateau instable.

8. Bakhbaki (2006, p. 75).

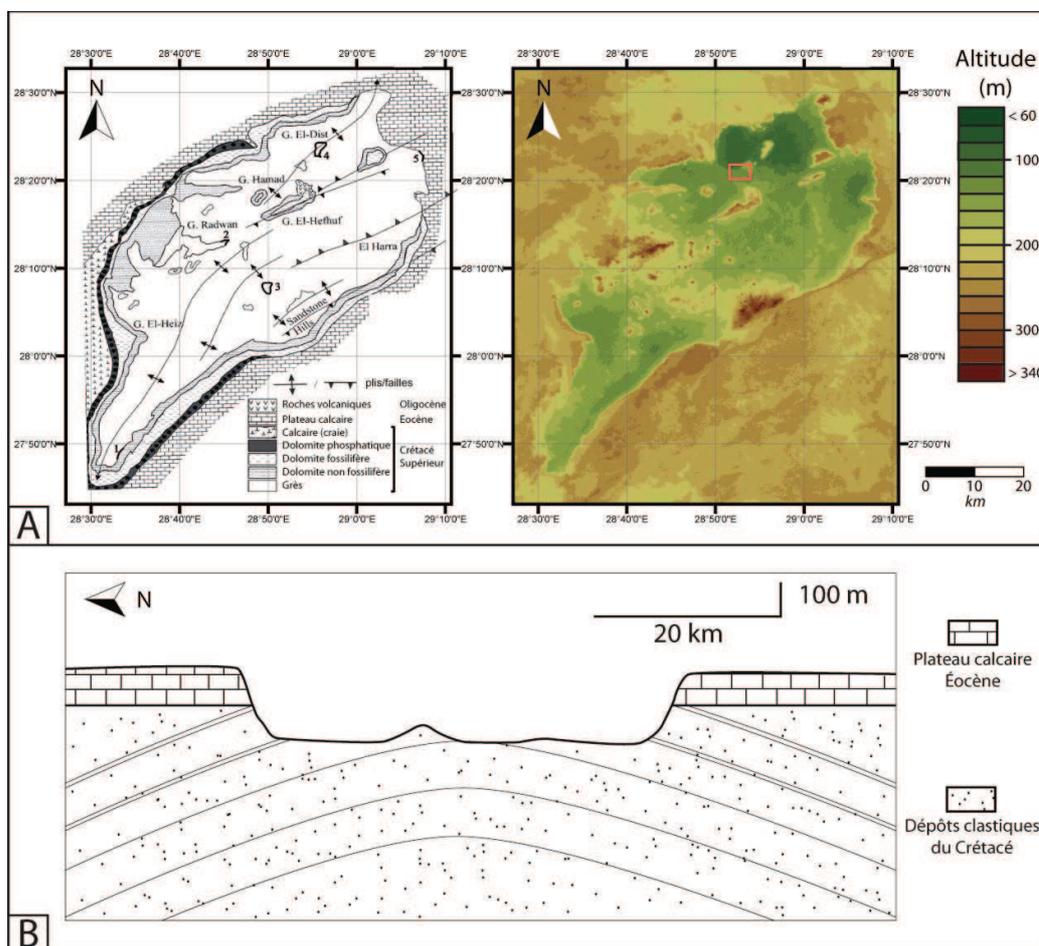


Figure 1.3 – A - Cartes géologique et topographique de l'oasis de Bahariya. Le carré rouge correspond au chef lieu (Figure 1.4, p. 25). B - Coupe géologique simplifiée théorique N-S de la dépression. Carte géologique d'après Catuneanu et al. (2006, p. 129), topographie à partir d'une dalle SRTM 90 (références voir Figure 1.1, p. 20).

1.1.3 Climat et ressource en eau

La dépression se trouve actuellement dans un milieu extrêmement aride où la quantité de précipitations annuelle n'excède pas les vingt millimètres⁹. On y trouve pourtant de la végétation et de l'activité humaine nécessitant un fort apport hydrique. Cette situation s'explique par la présence de nappes d'eau facilement accessibles. Ces dernières sont alimentées à la fois par des

9. Patterson *et al.* (2005, p. 3).

flux verticaux depuis des aquifères plus profonds et par infiltrations depuis la surface. En effet, l'eau remonte localement depuis le système aquifère des grès nubiens sous-jacent, situé à une profondeur variant de 90 à 150 m dans l'Oasis¹⁰, par artésianisme le long de zones de failles et de déformations pour venir nourrir des réservoirs plus superficiels, voire d'atteindre la surface¹¹. La recharge par infiltration quant à elle a lieu lors de phases de pluies saisonnières qui se mettent en place au début de périodes interglaciaires¹². La dernière de ces grandes phases humides date du début de l'Holocène (approximativement d'il y a 10500 à il y a 7300 ans) et a fortement influencé la démographie de l'Égypte¹³.

1.2 Archéologie

L'oasis de *Bahariya* présente un potentiel archéologique à la fois peu exploré et original. Le contexte environnemental particulier fait de la dépression un milieu semi-clos où les hommes ont dû s'adapter à des conditions différentes de celles de la vallée du Nil. De plus, l'isolement de la zone par un glacis désertique l'a relativement préservée de pillages intensifs et tenu à l'écart des fouilles au cours des siècles derniers. En effet, hormis les contributions de quelques explorateurs du 19^e siècle, les premiers vrais travaux archéologiques ont été réalisés par A. Fakhry à partir de 1942¹⁴. Il faudra ensuite attendre les années quatre-vingt-dix pour voir apparaître des études plus poussées, avec notamment la mise en place d'une mission annuelle de l'institut français d'archéologie orientale à partir de 1997¹⁵.

Différentes études ont montré que l'oasis, habitée depuis la Préhistoire¹⁶, a connu une évolution liée à celle de la vallée du Nil depuis plus de quatre mille ans. En effet, les différentes périodes de la civilisation égyptienne de

10. Hamdan & Sawires (2011, pp. 1338-1341).

11. Patterson *et al.* (2005, p. 2).

12. Crombie *et al.* (1997, pp. 351-352) ; Smith *et al.* (2004).

13. Kuper & Kröpelin (2006) ; Bubbenzer & Riemer (2007) ; Brookfield (2011).

14. Fakhry (1942, 1950, 1974).

15. Colin & Labrique (2001, pp. 162-165).

16. Svoboda (2006, 2013).

l'Ancien Empire¹⁷ à nos jours sont représentées au sein de la dépression, notamment dans un rayon de deux kilomètres autour d'*El Qasr*, lieu du centre supposé du chef-lieu antique nommé *Psôbthis* à l'époque romaine, où de vastes et nombreux gisements archéologiques ont été mis au jour¹⁸ (Figures 1.3 - 1.4). Ce même secteur est également soumis à une urbanisation massive qui s'intensifie d'année en année et vient menacer les vestiges encore non identifiés (Figure 1.4).

Parmi tous ces sites, l'étude ci-présente se concentre sur celui de *Qasr 'Al-lam*, où les questions archéologiques soulèvent de nombreux défis techniques liés à une couverture sédimentaire importante et une menace de destruction imminente.

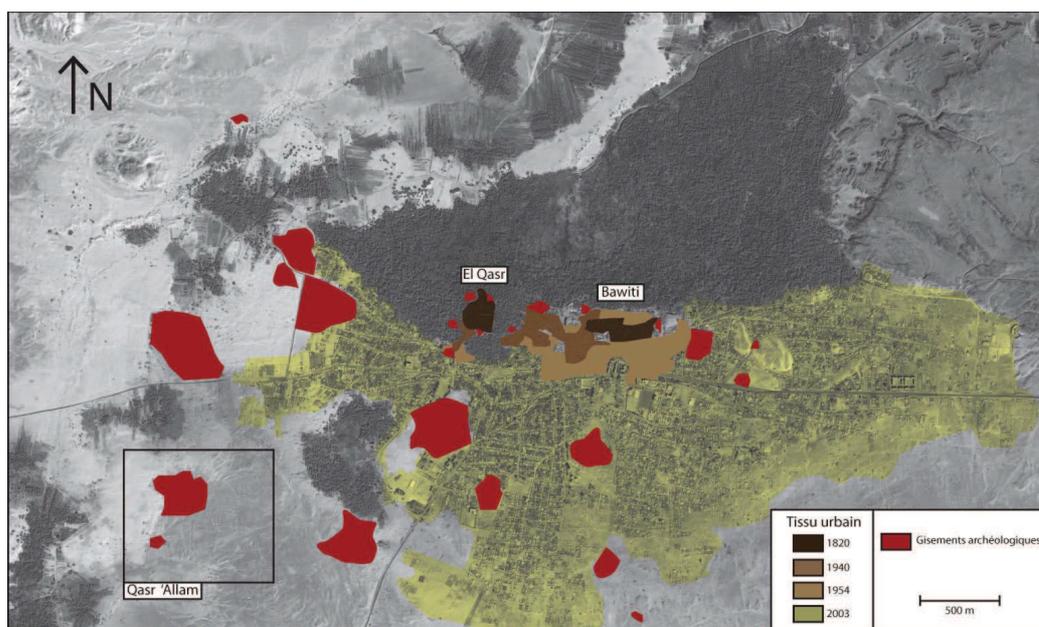


Figure 1.4 – Carte des principaux gisements archéologiques, hors systèmes hydrauliques, et évolution du tissu urbain autour du centre présumé du chef-lieu antique, aujourd'hui nommé *El Qasr*, d'après Colin (2013b, annexe 1). Le site de *Qasr 'Allam* se trouve au sud-ouest. Image prise par les satellites *Quickbird* en 2003 (*DigitalGlobe Incorporated*, licence *Eurimage SPA*).

17. L'Ancien Empire correspond à la période s'étalant de 2700 à 2200 avant l'ère commune.

18. Colin (2013b, pp. 173-179). L'époque romaine en Égypte correspond à la période s'étalant de l'annexion par l'empire romain en -30 à la conquête arabe en 641.

1.2.1 *Qasr 'Allam*

Le site de *Qasr 'Allam* (Figures 1.4 - 1.5) est particulièrement important pour la compréhension de deux aspects majeurs liés du paysage ancien de l'oasis : le bâti et l'irrigation. De plus, la zone nécessite un travail urgent de diagnostic et d'étude dans un souci de sauvegarde face à l'avancée d'exploitations agricoles et de lotissements en direction du site.

1.2.1.1 Système d'irrigation

De nombreux témoins de structures hydrauliques sont apparents en surface sur le site et facilement repérables à l'aide d'images satellites et de prospections au sol (Figure 1.5). On note plusieurs types d'indices :

- des structures circulaires comblées de sable et entourées de déblais, correspondant à des vestiges de puits (Figure 1.5, B) ;
- des structures allongées comblées de sable pouvant présenter des déblais en périphérie, témoins d'anciens chenaux ;
- des tas de déblais alignés (Figure 1.5, C), liés au creusement et à l'entretien par le biais de regards de *ganâts* (canaux souterrains) avoisinantes. Des structures similaires ont été fouillées et étudiées dans l'oasis de *Kharga*¹⁹ (Figure 1.5, D) ;
- des alignements de végétation (buissons et arbustes), le plus souvent dans le prolongement d'autres types de structures, indiquant des éléments sous-jacents contrastants avec leur encaissant (par l'accès à l'eau et/ou par la fertilité).

Les structures, aujourd'hui comblées voire partiellement recouvertes de sable, suivent grossièrement deux directions, les axes N-S et E-O, et semblent s'arrêter net au contact d'une nappe de sable à l'ouest et d'une zone plus lisse au sud-ouest (Figure 1.5, A), ce qui laisse supposer un effacement des traces de surface à la suite d'un dépôt sédimentaire auquel peut s'ajouter un phénomène d'érosion naturelle ou anthropique.

19. Wuttman *et al.* (1996).

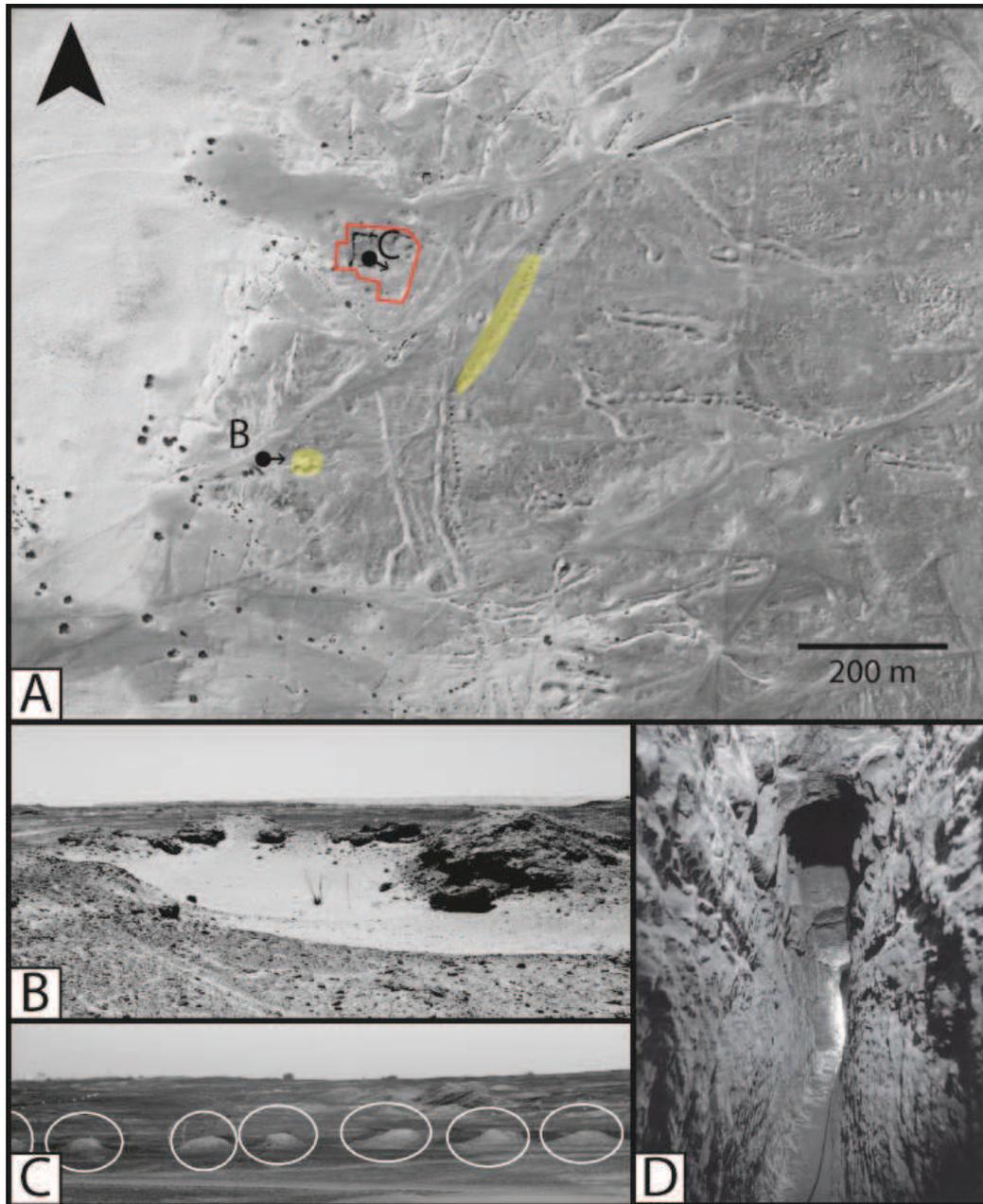


Figure 1.5 – A - Photographie satellite de 2003 du site de Qasr ‘Allam (références voir Figure 1.4, p. 25). Les flèches représentent l’orientation et les surfaces jaunes les cibles des photographies B et C. La zone fouillée avant 2012 est délimitée par le trait rouge. B - Puits reconnaissable par un centre comblé entouré de débris (Bruno Gavazzi). C - Alignements de débris témoins d’une qanât (Frédéric Colin). D – Vue intérieure d’une qanât fouillée à Kharga (Wuttman et al. 1996, p. 443).

1.2.1.2 Bâti

Avant toute intervention archéologique, les traces de bâti à *Qasr 'Allam* se résument à l'émergence du sommet d'une structure rectangulaire en brique crue interprétée par les habitants comme un fort arabe²⁰ (Figure 1.5, A, zone fouillée). La fouille du site, qui a débuté après un premier sondage en 2002, a permis de mettre au jour une série de bâtiments faisant partie d'un complexe religieux plus vaste du « Domaine d'Amon », qui a connu au moins deux périodes d'occupation différentes entre le 9^e et le 7^e siècle avant l'ère commune. À la première période correspond un ensemble d'ateliers et d'espaces de stockage appuyés sur une enceinte d'environ 50 m de côté, le tout constituant un temple. À l'extérieur de cette enceinte se trouvent des habitations (Figure 1.6, A-B). Toute la partie Ouest de l'ensemble semble soit détruite, soit recouverte par les constructions postérieures. La deuxième période semble avoir connu un changement d'échelle important, comme en témoignent les vestiges d'un bâtiment plus massif. D'une taille d'environ 40 x 25 m, il ne reste aujourd'hui qu'une partie de ses fondations sous la forme d'une plate-forme à caissons de 4 m d'élévation, construite sur les bâtiments plus anciens²¹ (Figure 1.6, A-C). On trouve des structures similaires dans la vallée du Nil, majoritairement dans le Delta, et datées principalement du premier millénaire avant l'ère commune²². Ces dernières peuvent alors avoir une fonction interprétée comme culturelle²³, défensive ou résidentielle²⁴, la première étant la plus courante. Dans ce dernier cas, le bâtiment se trouve en général en périphérie d'un complexe cultuel plus vaste avec une entrée pointant vers les éléments principaux de l'ensemble (Figure 1.7). La plate-forme de *Qasr 'Allam* possède les restes d'une rampe d'accès, mais celle-ci pointe vers la nappe de sable à l'Ouest qui ne présente aucune trace de bâtiment en surface

20. Labrique & Colin (2003, p. 159)

21. Colin (2011, pp. 57-68).

22. Spencer (1979) ; Traunecker (1987) ; Leclère (2008) ; Malecka-Drozd (2014).

23. Interprétés comme temples périptères (Spencer 1979) ou « greniers purs » (Traunecker 1987).

24. Dans ce cas les fonctions sont en général liées, comme c'est le cas pour les palais défensifs d'Avaris (Bietak 2005 ; Bietak & Forstner-Müller 2006). Pour d'autres exemples et de plus amples détails, voir Malecka-Drozd (2014).

(Figure 1.6, D). Cette absence laisse supposer, si l'interprétation culturelle est juste, que les vestiges ont pu être totalement recouverts par les sédiments ²⁵.

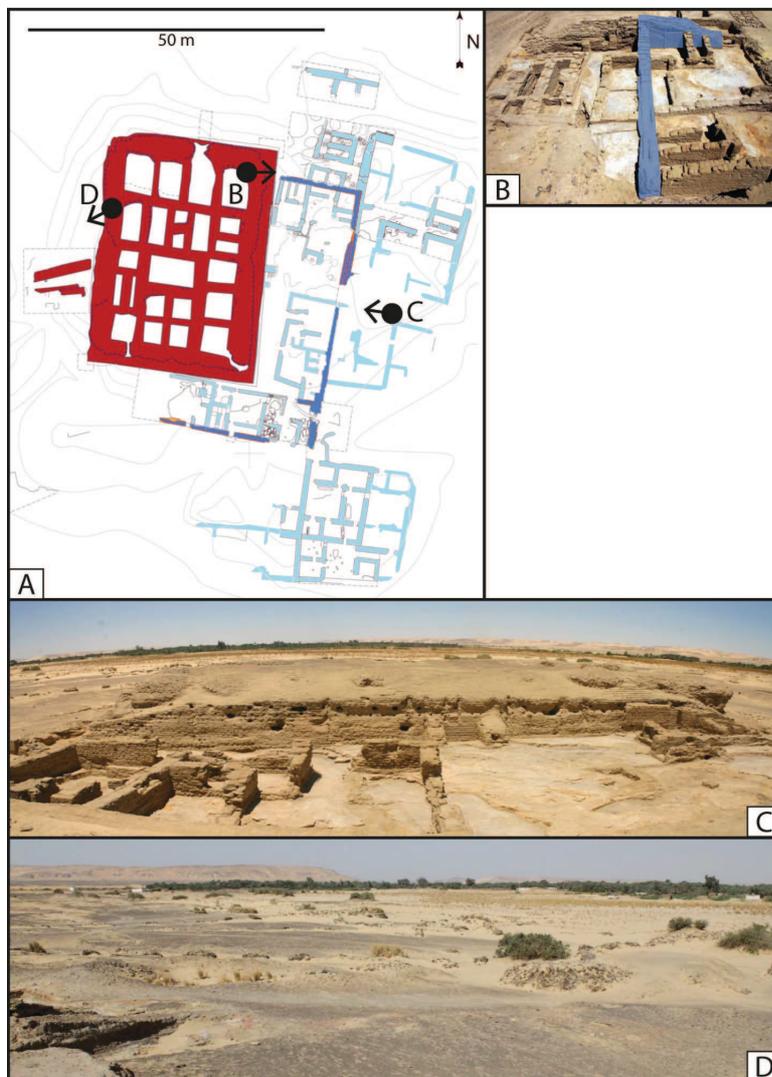


Figure 1.6 – A - Plan de la zone fouillée (Catherine Duvette, localisation voir Figure 1.5, A, p. 27) et position des photographies B, C et D. La couleur bleue correspond au temple et habitations de la première période d'occupation. La couleur rouge correspond à la plate-forme de la deuxième période d'occupation. B - Bâtiments de la première période, en bleu le mur extérieur du temple (Frédéric Colin). C - Plate-forme de la deuxième période (Frédéric Colin). D - Paysage dans la direction indiquée par la rampe d'accès de la plate-forme (Bruno Gavazzi).

25. Colin (2011, pp. 65-66).

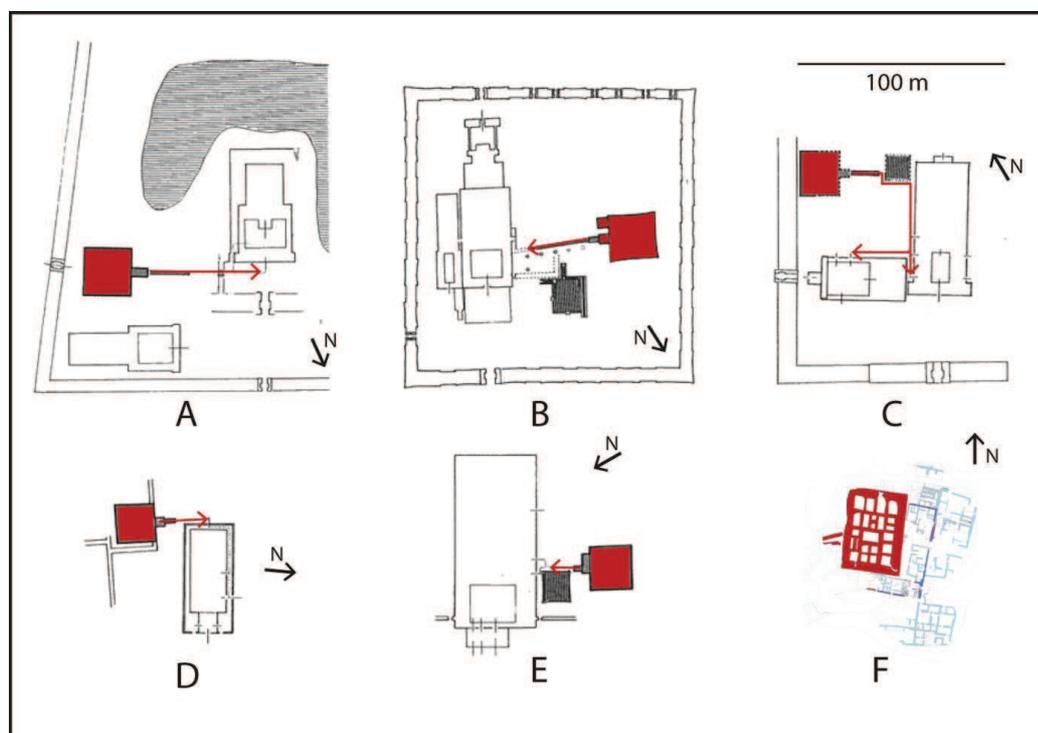


Figure 1.7 – Comparaison de plans de sites culturels où l'on trouve des plates-formes à caissons, modifiés d'après Traunecker (1987, Figure 2, p. 160), avec celui de Bahariya (Catherine Duvette). Les plate-formes sont représentées en rouge. A, B, C - Karnak, D - Hibis, E - Médamoud, F - Bahariya.

1.2.1.3 Menace du site

La collaboration étroite entre archéologues et le service des antiquités a permis la mise en place de mesures de protection sur de nombreux sites de l'oasis (délimitations, gardiennage, etc.). La pression démographique du chef-lieu en pleine expansion menace néanmoins de nombreux sites non répertoriés ou dont les vestiges ne sont pas directement visibles en surface²⁶, ce qui est le cas de *Qasr 'Allam*. En effet, l'exploitation agricole de la dune de sable à l'ouest, qui a démarrée en 2007, est en pleine expansion en direction du site (Figure 1.8, A). La mise en culture a lieu après décapage des sédiments afin de se rapprocher d'un sol argileux fertile (Figure 1.8, B), ce qui a pour conséquence la destruction des structures les moins enfouies.

26. Colin (2013b, pp. 152-173).

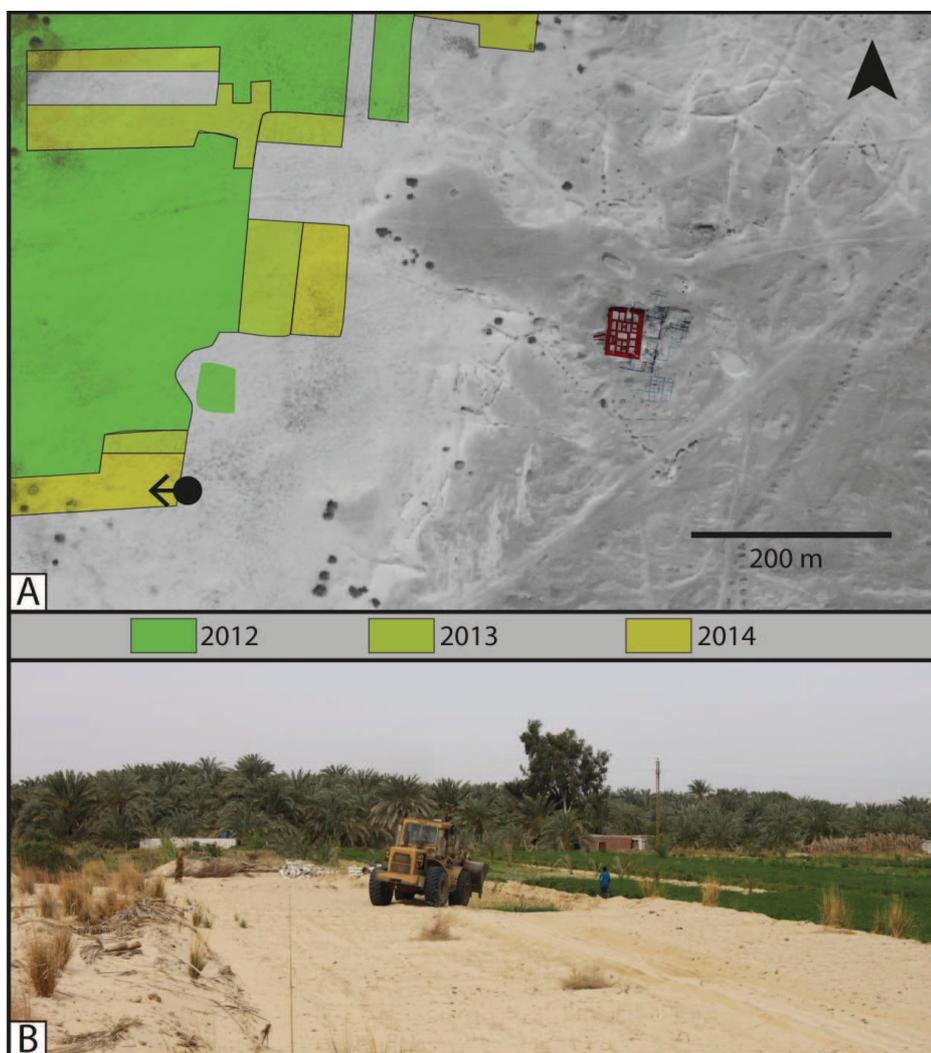


Figure 1.8 – A – Illustration de l'évolution de l'avancée des champs sur le site qui a débuté en 2007 sur une image satellite de 2003 (références voir Figure 1.4, p. 25). Chaque couleur correspond à la surface supplémentaire couverte par les cultures à chacune des trois observations faites sur le terrain en 2012, 2013 et 2014. Le plan des bâtiments mis au jour de la Figure 1.6 est visible à l'Est. La progression est divisée en trois étapes correspondant aux différentes observations. La flèche représente l'orientation de la photographie B. B – Préparation du terrain en 2013 pour une mise en culture en 2014 (Frédéric Colin).

1.2.2 Problématiques

Si les travaux conduits à *Qasr 'Allam* ont permis de révéler la présence d'un complexe cultuel et d'un vaste système d'irrigation, il semble qu'une grande partie des vestiges essentiels à la compréhension du site ne soit pas visible en surface. En effet, de nombreux indices laissent supposer que le site soit un exemple bien préservé d'un complexe composé de trois parties principales : un centre d'édifices culturels, ses bâtiments domestiques associés ainsi que son terroir agricole, le tout majoritairement recouvert de sédiments, notamment une dune de plusieurs mètres d'épaisseur. L'exploration de cette hypothèse se heurte à deux problèmes : -1- l'absence de traces du centre cultuel supposé ; -2- l'absence d'informations sur les liens spatiaux et chronologiques entre le bâti et le système d'irrigation.

Afin de surmonter ces problèmes, une approche géophysique associée à des fouilles ciblées est proposée. Cette dernière doit permettre de localiser et d'étudier les différents vestiges à l'échelle de plusieurs dizaines d'hectares en prenant en compte certaines contraintes techniques : les vestiges sont menacés d'une destruction à court terme par les terrains agricoles et la dune présente un relief accidenté et parsemé de buissons pouvant atteindre 0.8 m. La prospection doit donc être rapide et adaptée au terrain.

1.3 Géophysique

Un des objectifs de la géophysique est l'étude non-invasive du sous-sol à partir de paramètres mesurables en surface. Pour des profondeurs inférieures à une centaine de mètres, six méthodes basées sur différentes propriétés du terrain peuvent être mises en place. Les méthodes sismiques, électriques, électromagnétiques et de géo-radar consistent en l'étude de la réaction du milieu à un *stimulus*, respectivement les ondes acoustiques, le courant continu, le courant alternatif de basse fréquence et le courant alternatif de haute fréquence. On parle alors de méthodes actives. La gravimétrie et le magnétisme sont au contraire qualifiés de passives : elles reposent sur l'étude des variations d'un champ terrestre inhérentes au milieu, respectivement le champ de

pesanteur et le champ magnétique.

En contextes archéologiques, la méthode la plus utilisée est celle du magnétisme, et ce pour deux raisons²⁷ : premièrement, la rapidité de mesure et la légèreté des instruments, supérieures à celles des autres techniques, rendent possible la cartographie de larges zones avec une grande densité de données ; deuxièmement, la plupart des traces anthropiques présente un contraste d'aimantation avec leur encaissant, ce qui rend l'identification de vestiges archéologiques, même très subtils, possible dans la plupart des cas.

Les méthodes actives sont en général utilisées pour obtenir des coupes verticales et non pour cartographier précisément une zone. En effet, excepté pour le radar, l'acquisition est relativement lente, si bien qu'il est difficile d'obtenir une densité importante de profils de mesure. Le radar est, quant à lui, très dépendant de la conductivité du milieu ; la présence d'eau ou d'argile peut par exemple fortement diminuer la qualité des résultats. En gravimétrie, méthode passive, la limite est celle de la précision. En effet, les instruments actuels ne permettent pas de mesurer les anomalies à l'échelle archéologique, hormis celles dues à des vides souterrains suffisamment grands. Le magnétisme est donc bien la méthode géophysique la plus appropriée aux contraintes de surface et de praticabilité du site. Afin de mettre en place la solution la plus adaptée aux problématiques posées, il est possible de choisir entre différents types de capteurs et plusieurs modes d'acquisition.

1.3.1 Les différents types de capteurs

Il existe deux grands types de capteurs : les capteurs scalaires et les capteurs vectoriels. Les capteurs scalaires mesurent directement l'intensité du champ magnétique. Les capteurs vectoriels permettent quant à eux d'obtenir à la fois l'orientation et l'intensité à l'aide de la mesure de composantes directionnelles. Si les premiers sont absolus, en général plus précis et plus simples à mettre en œuvre sur le terrain, les seconds permettent de corriger les perturbations magnétiques indésirables.

27. Linford (2006, pp. 2220-2227).

1.3.1.1 Magnétomètres scalaires

Magnétomètres à précession

Les magnétomètres à protons ont été les premiers magnétomètres à être exploités en archéologie, et ce à partir des années soixante²⁸. Le principe mis en œuvre est celui de la précession des protons. En effet, après avoir été alignés à l'aide d'un champ magnétique continu, les protons vont se mettre à précessionner autour du champ magnétique ambiant à une fréquence directement proportionnelle à l'intensité de ce même champ. On parle alors de fréquence de Larmor. En mesurant cette dernière, on peut donc obtenir une mesure absolue de l'intensité du champ magnétique. Concrètement, un dispositif de mesure consiste en un contenant rempli d'un liquide comprenant une forte proportion de protons libres, en général du kérosène, entouré par une bobine (Figure 1.9). Cette dernière a deux fonctions : tout d'abord générer un champ magnétique continu assez fort pour aligner les protons et ensuite mesurer la fréquence de précession des protons. De tels magnétomètres sont actuellement capables d'une précision de l'ordre de 0.1 nT . Ils sont néanmoins aujourd'hui très peu utilisés en cartographie magnétique pour plusieurs raisons : le processus pour obtenir une seule mesure dure plusieurs secondes alors que les autres types de capteurs sont capables de fréquences d'acquisition supérieures à l'hertz ; de plus, l'énergie cinétique vient perturber l'alignement des protons, ce qui rend le dispositif très sensible aux accélérations et interdit l'acquisition en mouvement.

Les magnétomètres *Overhauser* utilisent le même principe général de précession, non pas des protons, mais des électrons. Il en résulte un alignement plus rapide, qui permet une fréquence de mesure plus forte, jusqu'à quelques hertz, pour une précision similaire à celles des magnétomètres à protons.

Magnétomètres à pompage optique

Inventés peu de temps après le magnétomètre à protons, il faut attendre la fin des années soixante-dix pour voir la popularisation des magnétomètres à pompage optique grâce à l'amélioration de leur robustesse et surtout de

28. La première mesure a été réalisée en mars 1958 (Aitken 1958).



Figure 1.9 – *Magnétomètre à protons. Modèle GSM-19 de GEM systems (Bruno Gavazzi).*

leur précision (Figure 1.10). Le principe mis en œuvre est celui de la relation entre l'intensité du champ magnétique et l'énergie nécessaire pour faire changer de niveau d'énergie les électrons de valence d'un métal alcalin, en général le césium ou le potassium. Pour cela, on utilise le procédé du pompage optique : après irradiation lumineuse les électrons vont changer de niveau d'énergie jusqu'à être complètement « pompés » vers le niveau le plus haut. Le gaz devient ainsi transparent. Il suffit ensuite d'appliquer une onde électromagnétique dont on fait varier progressivement la fréquence. Lorsque cette dernière correspond à la différence d'énergie entre les différents niveaux, le gaz devient opaque. On peut alors en déduire la valeur de l'intensité du champ magnétique. L'avantage de ce type de capteur réside dans leur grande précision (jusqu'à 0.001 nT) ainsi que dans leur rapidité d'acquisition (jusqu'à 100 Hz). De plus, il n'est pas sujet aux perturbations cinétiques, ce qui rend la mesure en mouvement possible. C'est pourquoi ce sont aujourd'hui les magnétomètres les plus utilisés en prospection, notamment archéologique. Ce type de capteur présente néanmoins plusieurs inconvénients : sa consommation énergétique importante ainsi que sa complexité de fabrication rend tout dispositif à la fois lourd et coûteux.



Figure 1.10 – Magnétomètre à pompe optique au césium. Modèle G-858 de Geometrics (Bruno Gavazzi).

1.3.1.2 Magnétomètres vectoriels

Magnétomètres à vanne de flux (*fluxgates*)

Les magnétomètres à vanne de flux (ou *fluxgates*) sont les plus anciens magnétomètres encore utilisés en prospection. Inventés dans les années 1930, ils sont tout d'abord développés durant la seconde guerre mondiale afin de localiser les sous-marins depuis les airs. Une sonde consiste en un noyau ferromagnétique dont le niveau de saturation est connu, entouré de deux bobines. Le principe de fonctionnement est le suivant²⁹ : la bobine dite primaire est parcourue par un courant alternatif de façon à générer des saturations successives et de sens opposé le long de l'axe du noyau. Ainsi la composante de tout champ magnétique externe continu dans cette direction vient successivement s'ajouter ou s'opposer à la saturation. Il y a donc une variation du flux magnétique dans le noyau, ce qui crée une tension électrique proportionnelle dans la deuxième bobine. Cette différence de potentiel est mesurée et l'intensité de la composante externe en est déduite. Trois sondes de ce type peuvent être montées orthogonalement afin de mesurer les trois composantes du champ externe. On obtient ainsi un magnétomètre vectoriel (Figure 1.11). Les avan-

29. Primdahl (1979).

tages de ce type de capteur sont nombreux : ils sont légers, très résistants, consomment peu et ne sont pas perturbés par le mouvement. Ces caractéristiques en font le magnétomètre par excellence pour l'exploration spatiale et la prospection minière. Ces instruments possèdent néanmoins certaines limites : les mesures sont relatives et les sondes présentent des défauts de décalage, de sensibilité et d'angle importantes ainsi qu'une dépendance forte à la température. Ce sont également les moins précis des magnétomètres avec une précision maximale de l'ordre du nT ³⁰.



Figure 1.11 – Magnétomètre à vanne de flux. Modèle Mag-03 MC70 de Bartington Instruments (Bruno Gavazzi).

Magnétomètres supraconducteurs à interférences quantiques

Appelés plus communément SQUID, ces instruments exploitent les propriétés de la supraconductivité : le courant généré par une boucle de supraconducteur est extrêmement sensible au flux magnétique la traversant. Il est ainsi possible de mesurer la différence du champ magnétique entre deux points avec une précision de l'ordre du fT/m (10^{-6} nT/m). Connus depuis le début des années quatre-vingts, seule les avancées technologiques récentes ont

³⁰. Peut varier du nT à plusieurs centaines de nT en fonction de la qualité de leur étalonnage (Munsch *et al.* 2007, pp. 169-171).

permis la mise en place de ces magnétomètres en contexte archéologique³¹ (Figure 1.12). Ces dispositifs ne sont néanmoins que très rarement utilisés du fait de la nécessité d'obtenir et garder des températures de quelques kelvins (soit environ $-270^{\circ}C$), ce qui les rend à la fois extrêmement coûteux, lourds et gourmands en énergie³².

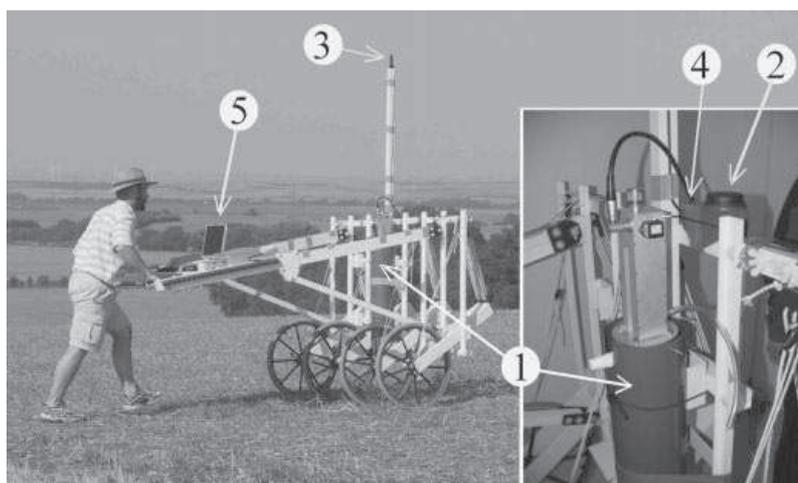


Figure 1.12 – Dispositif utilisé en archéologie utilisant des magnétomètres SQUID (Schultze et al. 2007, Figure 1, p. 227). 1 - Électronique centrale et cryostat. 2/3 - Antenne GPS. 4 - système inertiel. 5 - Interface visuelle.

1.3.2 Les différents modes d'acquisition

1.3.2.1 Gradiométrie

Le principe de la gradiométrie consiste en la mesure du gradient, en général vertical, du champ magnétique. Concrètement, on étudie soit la différence d'intensité, soit la différence de la composante verticale, entre deux capteurs placés l'un au-dessus de l'autre. Le gros avantage de la méthode est l'élimination des perturbations temporelles. En effet, on considère les deux capteurs suffisamment proches pour être affectés de la même manière par ces dernières, on retrouvera donc dans la mesure seulement des variations spatiales.

31. Schultze *et al.* (2007).

32. Gaffney (2008, pp. 316-319).

Mathématiquement, le gradient du champ total correspond à sa dérivée directionnelle. Il est donc théoriquement possible de passer du gradient au champ par le biais d'une intégrale. Dans la pratique, la mesure n'est pas celle du gradient, mais de la différence de la mesure entre deux capteurs : différence d'intensité pour la gradiométrie dite scalaire et de composante directionnelle (en général verticale) pour la gradiométrie dite vectorielle. L'étude de cas synthétiques permet de mettre en évidence que dans la pratique, l'impossibilité de tenir parfaitement les deux capteurs dans le plan de mesure souhaité conduit à une approximation qui peut être considérée comme bonne au niveau des intensités, mais qui est également à l'origine d'une dyssymétrie (ou *skewness*) du signal (Figure 1.13). Cette imprécision peut alors conduire à des erreurs lors du calcul champ à partir de données de gradiométrie³³.

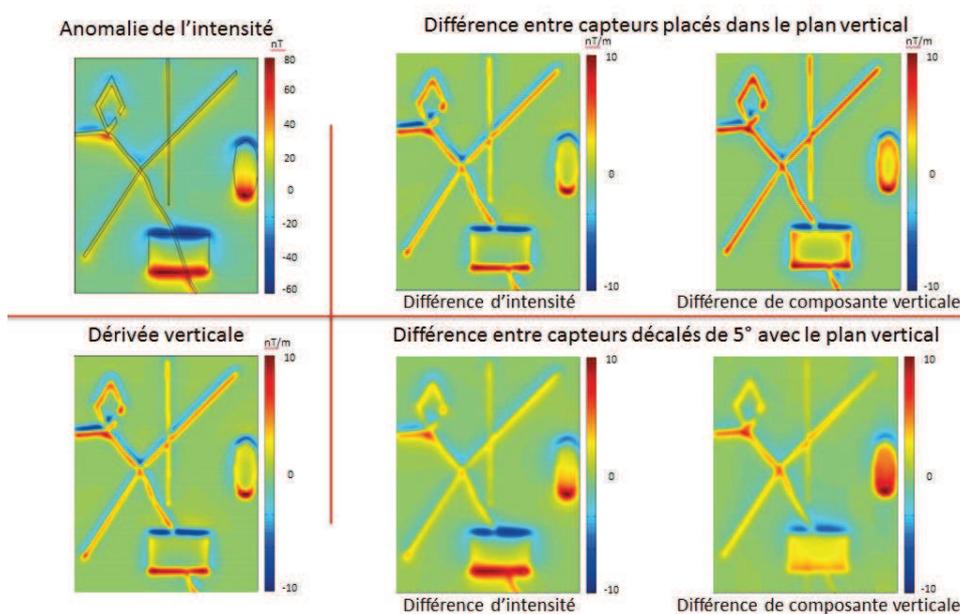


Figure 1.13 – Cas synthétique d'un modèle de volumes de formes différentes qui possèdent une aimantation induite et qui sont placés à 1 m de profondeur. De gauche à droite et de haut en bas, calcul au niveau du sol de : l'anomalie du champ total (et représentation du modèle), les gradiométries verticales scalaire et vectorielle théoriques, la dérivée verticale de l'anomalie du champ total et les gradiométries verticales scalaire et vectorielle pour un décalage de cinq degrés des capteurs par rapport au plan vertical.

33. Cette imprécision est illustrée par la figure 4.18, page 123.

La mesure du gradient a également pour effet d'accentuer le signal à courte longueur d'onde en atténuant le signal à longueur d'onde plus large, ce qui en fait un outil très performant pour l'identification d'éléments peu profonds ou présentant un contraste fort avec l'encaissant. En contrepartie, des éléments plus profonds ou présentant un contraste d'aimantation plus faible sont difficilement identifiables. La gradiométrie reste néanmoins la méthode la plus utilisée en archéologie, et notamment en Égypte, grâce à sa simplicité de mise en œuvre et son efficacité pour imager des structures bâties peu enfouies³⁴.

1.3.2.2 Mesure du champ total

En mesure du champ total un seul capteur est utilisé, ce qui rend le dispositif plus léger et sobre qu'un gradiomètre. Il est possible d'utiliser des magnétomètres scalaires, qui mesurent directement l'intensité du champ magnétique, ou vectoriels, qui permettent de calculer intensité ainsi que direction à partir des trois composantes de l'espace. L'avantage de ce dernier type de capteur est la possibilité de modéliser et corriger les signaux connus perturbant la mesure, comme ceux générés par l'appareillage lui-même.

Comparée à la mesure gradiométrique, la mesure du champ total possède l'avantage de l'enregistrement du signal dans sa totalité sans accentuer de longueur d'ondes spécifiques. Il est alors possible d'imager des structures plus profondes ou présentant un contraste d'aimantation avec l'encaissant plus faible. En contrepartie, le signal comprend à la fois les variations temporelles et spatiales du champ magnétique.

1.4 Approche proposée et problématiques

Conformément aux problématiques archéologiques posées précédemment, l'étude géophysique doit permettre de localiser et d'analyser des vestiges archéologiques enfouis de différentes natures en un intervalle de temps restreint.

34. Pour le domaine de l'archéologie en général, voir les ouvrages de revue de la littérature que sont Linford (2006), Gaffney (2008) et Oswin (2009) ; pour l'égyptologie en particulier, on peut noter les nombreux travaux de Tomasz Herbich, par exemple Herbich & Spencer (2006) ; Herbich & Peeters (2006) ; Forstner-Müller *et al.* (2008) ; Herbich (2011).

Une première prospection géophysique a été réalisé par Tomasz Herbich en 2007 et 2010. Cette dernière, réalisée à l'aide d'un gradiomètre vectoriel (*Geoscan FM256*) a permis de mettre en évidence des vestiges de structures d'irrigation ainsi que des traces de bâti directes (murs) ou indirectes (négatifs : tranchées de fondation), le tout dans une zone qui ne présente aucun indice de surface³⁵. Cette prospection a également révélé certaines limites de la méthode sur le site. La prospection s'est limitée à une surface plane et dégagée, du fait de la difficulté d'implanter un carroyage sur la dune. On remarque également que les éléments de bâti sont difficilement identifiables et à l'origine d'un signal faible, alors que peu enfouis, ce qui peut témoigner d'un contraste d'aimantation faible et à la limite de la détection. Des éléments similaires seront donc probablement invisibles sous la dune pour cause de recouvrement plus épais.

Afin de ne pas être confronté à ces limites, la méthode proposée se base sur la mesure du champ total, plus sensible au signal de longueur d'onde plus large³⁶. Dans le but d'augmenter la praticabilité et la vitesse de mesure, on va chercher à développer un dispositif multi-capteur qui, couplé à un système de localisation, permet une acquisition simultanée de plusieurs profils positionnés dans l'espace. Le rapport *vitesse/précision* est alors contrôlé en modulant l'écart entre les magnétomètres ainsi que leur distance au sol. Afin de ne pas être limité par l'aimantation du dispositif lui même, on propose également d'utiliser des magnétomètres à vanne de flux à trois composantes. Ces capteurs sont en effet très légers et de faibles consommateurs d'énergie, et les seuls à permettre, par le biais de la mesure vectorielle, la compensation de l'aimantation du dispositif.

Un autre point important de l'approche proposée repose dans l'aspect multi-échelle et l'intégration multi-disciplinaire. En effet, la prospection magnétique en archéologie consiste le plus souvent à localiser les structures à l'aide d'une carte. Dans cette étude il est proposé d'utiliser trois échelles de mesure différentes intégrées à une réflexion d'équipe multidisciplinaire. Pre-

35. Colin (2007, pp. 315-317) ; Colin (2010, p. 329).

36. Et donc témoins de structures plus profondes ou montrant un contraste d'aimantation plus faible avec l'encaissant.

mièrement, une cartographie à grande échelle avec une précision métrique permet de couvrir une surface importante du site. Le résultat obtenu permet de définir, à l'aide d'outils d'interprétation et par comparaison et confrontation avec les structures connues et des sondages tests, différents types de vestiges et zones d'intérêts. Dans un deuxième temps, une cartographie plus fine de ces zones d'intérêts à l'échelle centimétrique et ses outils d'interprétation associés permettent d'obtenir plus de détails sur les structures ainsi que d'organiser et de compléter des fouilles ciblées. Enfin, une dernière échelle de mesure à lieu directement sur la preuve terrain après la fouille. Ainsi, les différents résultats de la mesure magnétique, de la fouille archéologique et des études sédimentaires et pédologiques sont intégrés tout au long du processus et permettent de développer une compréhension en trois dimensions du sous-sol ainsi que de fournir des retours pour l'amélioration de la méthode magnétique.

Ces choix soulèvent de nouvelles problématiques. Premièrement, être capable d'étalonner les magnétomètres relatifs à vanne de flux et corriger les effets du dispositif lui-même ainsi que les variations temporelles pour n'obtenir que les variations spatiales du champ. Deuxièmement, adapter des appareils de mesure pour chaque échelle. Enfin, développer des outils d'analyse et d'interprétation spécifiques au contexte du site afin d'extraire les informations voulues des données.

Chapitre 2

Quelques éléments de magnétisme

Sommaire

2.1	Historique de l'étude du magnétisme	45
2.2	Dipôles et champs magnétiques	47
2.2.1	Définitions	47
2.2.2	Propriétés des champs magnétiques	48
2.3	Propriétés magnétiques des matériaux	49
2.3.1	Matériaux diamagnétiques	50
2.3.2	Matériaux paramagnétiques	50
2.3.3	Matériaux ferromagnétiques (sens large)	51
2.4	Le champ magnétique terrestre	52
2.4.1	Définitions	52
2.4.2	Les différentes contributions au champ	54
2.5	Les anomalies magnétiques	55
2.5.1	Anomalie vectorielle	55
2.5.2	Anomalie de l'intensité du champ magnétique	56
2.5.3	Approximation de l'anomalie	58
2.5.4	Discussion sur la validité de l'approximation de l'anomalie	58

Chapitre 2 : Quelques éléments de magnétisme

Le but de ce chapitre est de présenter les bases nécessaires à la compréhension de la prospection magnétique. Après un bref historique du savoir de l'homme sur la question (section 2.1), les concepts de dipôles et de champs magnétiques sont expliqués (section 2.2) avant une description des différentes propriétés magnétiques des matériaux (section 2.3). La section suivante concerne les sources et caractéristiques du champ magnétique terrestre (section 2.4). Cette présentation conduit logiquement à la définition et la discussion du concept d'anomalie sur lequel repose la base des chapitres suivants (section 2.5).

2.1 Historique de l'étude du magnétisme

Il est difficile de savoir à quand remontent les premières observations du magnétisme par l'homme. Le phénomène d'attraction entre la magnétite¹ et le fer était vraisemblablement déjà connu il y a plus de 2500 ans par les Grecs². C'est d'ailleurs à ces derniers que l'on doit les termes actuels dérivant de *Magnes*, du nom de la cité antique de *Magnesia* dont les alentours étaient naturellement abondants en magnétite. Aucune source ne fait toutefois mention de la découverte du phénomène, si bien que différentes hypothèses l'attribuent soit à une des civilisations du bassin méditerranéen, soit aux Chinois, entre le 27^e et le 6^e siècle avant l'ère commune³. Durant ces périodes anciennes, le magnétisme est plutôt considéré comme une curiosité de la nature sans grand intérêt pratique. Les premières traces écrites décrivant un mécanisme comportant une aiguille magnétisée indiquant le nord, en d'autres termes une boussole, datent de la fin du XI^e au début du XIII^e siècle

1. Un oxyde de fer (Fe_2O_4) appelé aussi « pierre d'aimant ».

2. La plus ancienne mention connue de la magnétite est attribué à Thalès (644-548 avant l'ère commune) par Aristote dans *De Anima*. Les différentes sources antiques sont discutées par Mitchell (1946).

3. Les différentes hypothèses sont énoncées et discutées par Mitchell (1932).

en fonction des différentes régions du monde⁴. Une fois encore, ces sources décrivent des appareils déjà en utilisation et non leur invention. Si bien que l'origine de la boussole est toujours sujette aux spéculations.

Malgré cette avancée technique, le magnétisme est à l'époque très souvent associé à des superstitions⁵. Le premier réel traité scientifique connu provient de Pierre de Maricourt (ou *Petrus Peregrinus*) qui, en 1269, présente dans son *Epistola de Magnete* les connaissances de l'époque sur le sujet : les principes de construction d'une boussole et le caractère dipolaire des aimants⁶. Le même exercice est réalisé en 1600 par William Gilbert qui pose les bases du géomagnétisme dans son *De Magnete* en démontrant que la Terre se comporte elle-même comme un aimant ainsi que les principales propriétés du magnétisme rémanent⁷.

De nombreuses découvertes sont faites durant les siècles suivants⁸. Les premiers résultats d'études globales du magnétisme terrestre sont publiés en 1701 et 1702 par Halley. Les liens entre magnétisme et électricité sont démontrés par Oersted et Ampère en 1820. Un large réseau d'observatoires magnétiques permanents est construit à partir de 1836. En 1850, le magnétisme est utilisé pour la première fois dans la prospection minière afin de localiser des filons de fer. La même méthode est appliquée à l'exploration d'autres ressources du sous-sol à partir de 1900. Le potentiel de l'application archéologique est envisagé à partir de 1904, mais il faudra attendre les années 1950 et l'invention du magnétomètre à protons afin de conduire les premières prospections.

Au cours des soixante dernières années, les avancées techniques majeures, tout d'abord dans le domaine des transistors puis dans celui de l'informatique, ont conduit à une explosion du nombre de dispositifs de mesures et d'outils

4. Vers 1100 en Chine, 1187 en Europe et 1220 dans les mondes arabes et perses (Mitchell 1932, pp. 122-123).

5. Il était par exemple très commun de bannir les oignons et l'ail des bateaux par crainte de dérèglement des boussoles.

6. Ouvrage réalisé avant l'invention de l'imprimerie, il existe de nombreuses publications et traductions ultérieures, par exemple Speiser & de Grave (1975).

7. Gilbert (1600).

8. Pour une histoire du géomagnétisme plus détaillée voir Stern (2002) ; Courtillot & Le Mouél (2007). L'histoire des méthodes magnétiques pour l'exploration est passée en revue par Nabighian *et al.* (2005, pp. 33-38).

d'interprétation à disposition pour étudier la sub-surface, si bien qu'aujourd'hui les méthodes magnétiques sont la branche géophysique la plus utilisée en archéologie⁹.

2.2 Dipôles et champs magnétiques

2.2.1 Définitions

Le magnétisme est un phénomène naturel qui résulte de mouvements de charges électriques à un niveau atomique. Ces mouvements sont à l'origine de la formation de dipôles, qui se caractérisent par un moment magnétique \vec{m} et un champ magnétique associé \vec{A} (Figure 2.1). Ainsi, toute source magnétique est composée à la fois d'un pôle positif, ou nord, et d'un pôle négatif, ou sud. Le moment est défini comme la force générée par une boucle de courant équivalente au dipôle perpendiculairement à sa surface¹⁰, son intensité s'écrit en ampère mètre carré ($A.m^2$). Le champ magnétique quant à lui correspond à la densité de flux magnétique généré par la boucle de courant¹¹. Son intensité se mesure en teslas (T), avec $1T = 1kg.s^{-2}.A^{-1}$.

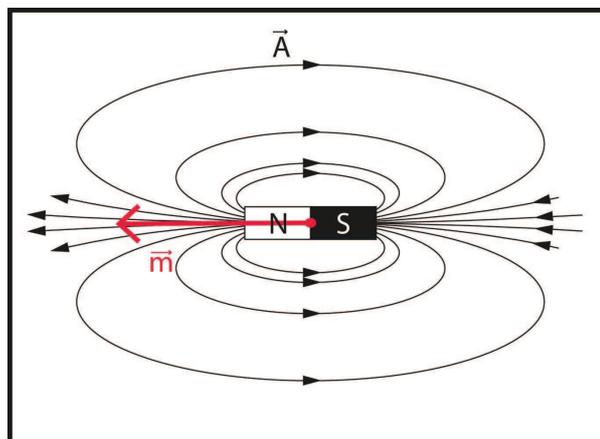


Figure 2.1 – Représentation schématique d'un dipôle et de ses lignes de champ magnétique. Les flèches noires représentent le champ \vec{A} associé au dipôle dont le moment magnétique \vec{m} est représenté par la flèche rouge.

9. Linford (2006, p. 2220), Gaffney (2008, p. 316).

10. Blakely (1995, pp. 72-74).

11. Blakely (1995, pp. 65-68).

2.2.2 Propriétés des champs magnétiques

Une des propriétés fondamentales du magnétisme est le caractère conservateur du champ. En effet, pour toute région hors de la source, les flux magnétiques entrant et sortant sont toujours égaux. En d'autres termes, les lignes de champ forment toujours un circuit fermé (Figure 2.1), ce qui se traduit mathématiquement par l'équation locale de Maxwell-Thomson¹²

$$\operatorname{div}\vec{A} = 0. \quad (2.1)$$

Cette qualité conservatrice du champ magnétique permet de le définir comme l'opposé du gradient d'un champ scalaire que l'on nomme potentiel. On peut alors écrire

$$\vec{A} = -\operatorname{grad}(\varphi) = -\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}, \frac{\partial\varphi}{\partial y}, \frac{\partial\varphi}{\partial z}\right), \quad (2.2)$$

avec φ le potentiel magnétique et $Oxyz$ un repère orthonormé. Ce potentiel peut être obtenu à partir du moment magnétique en considérant le dipôle comme la somme de deux monopôles ou boucles de courant de signes opposés¹³. En posant \vec{r} le vecteur distance entre l'observation et la source, cela donne

$$\varphi(r) = C_m \frac{\vec{m}\vec{r}}{r^3}, \quad (2.3)$$

avec C_m constante d'ajustement dépendante du système d'unité utilisé ; elle vaut 1 en *C.G.S.* et 10^{-7} henry.mètre⁻¹ en *S.I.*¹⁴.

Le laplacien du potentiel Δ_φ , défini comme la divergence du gradient, s'obtient en combinant les équations 2.1 et 2.2. On a alors

$$\Delta_\varphi = \left(\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}\right) = 0. \quad (2.4)$$

12. Blakely (1995, p. 68, équation 4.5).

13. Blakely (1995, pp. 72-75).

14. Le système centimètres-grammes-secondes (*C.G.S.*) a été progressivement remplacé par le système international (*S.I.*) dans les publications scientifiques à partir des années 1980.

Le laplacien est nul, ce qui signifie que les dérivées secondes du potentiel magnétique sont liées. On peut alors en calculer une à partir des deux autres. En d'autres termes, il est possible de déduire le champ dans l'espace (3D) à partir de mesures dans un plan (2D).

2.3 Propriétés magnétiques des matériaux

À l'échelle macroscopique, les matériaux se caractérisent par leur aimantation \vec{M} qui correspond par définition à la somme des dipôles individuels qui constituent la source divisée par le volume V de cette dernière¹⁵, on note alors

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum_n \vec{m}_n, \quad (2.5)$$

avec n le nombre de dipôles. Si l'on considère que ces derniers possèdent tous le même moment, en d'autres termes que le matériau est magnétiquement homogène, l'aimantation correspond alors à la densité volumique de moment magnétique dipolaire et l'équation 2.5 devient

$$\vec{M} = \frac{\vec{m}}{\Delta V}, \quad (2.6)$$

avec ΔV élément de volume. L'aimantation s'exprime donc en ampères par mètre ($A.m^{-1}$). Cette dernière est à l'origine de la création en dehors des sources d'un champ magnétique propre \vec{A} qui se décompose en deux parties : induite \vec{A}_i et rémanente \vec{A}_r , tel que

$$\vec{A} = \vec{A}_i + \vec{A}_r. \quad (2.7)$$

La partie induite est nommée ainsi car liée à la présence d'un champ magnétique externe \vec{R} . Ce dernier met en mouvement des charges électriques du matériau, ce qui génère un champ \vec{A}_i parallèle et proportionnel à \vec{R} . On peut alors écrire

$$\vec{A}_i = \chi \vec{R}, \quad (2.8)$$

15. Blakely (1995, pp. 81-82).

avec χ coefficient de proportionnalité que l'on nomme susceptibilité magnétique. La partie rémanente quant à elle correspond à l'aimantation présente en l'absence de tout champ externe. C'est donc la seule partie permanente de l'aimantation. En combinant les équations 2.7 et 2.8, soit

$$\vec{A} = \chi \vec{R} + \vec{A}_r, \quad (2.9)$$

on remarque que les matériaux peuvent être caractérisés à partir de deux paramètres : leur susceptibilité magnétique et leur aimantation rémanente. On peut ainsi les classer dans trois différents groupes, en fonction de leur comportement au sein d'un champ extérieur¹⁶.

2.3.1 Matériaux diamagnétiques

Le diamagnétisme se traduit par la création d'un champ magnétique induit très faible dans la direction inverse à celle du champ extérieur. Ce phénomène s'explique par une légère modification des orbites des électrons par la source externe. Il s'applique donc à tous les matériaux. Quoi qu'il en soit, c'est également le plus faible des comportements magnétiques, si bien qu'il devient négligeable en présence d'un autre type de comportement. On définit alors comme matériaux diamagnétiques ceux qui ne le sont qu'exclusivement. Ces derniers ne possèdent pas d'aimantation rémanente et leur susceptibilité est constante, très petite et inférieure ou égale à zéro. L'effet est tellement faible qu'on parle également de matériaux non-magnétiques. Cette catégorie est la plus abondante à la surface de la Terre : eau, pétrole, quartz, calcite, or, plastiques, etc.

2.3.2 Matériaux paramagnétiques

Le paramagnétisme se traduit par la création d'un champ magnétique induit faible dans la même direction que celle du champ extérieur. Ce phénomène s'explique par la présence d'électrons non appariés : en effet, à un niveau

16. Cette classification, décrite dans les sections suivantes, peut être retrouvée dans de nombreux ouvrages de référence, par exemple Reynolds (1997, pp. 122-131).

microscopique, les électrons peuvent être considérés comme des mini-dipôles qui, lorsqu'ils sont appariés, se compensent. Les électrons non appariés ne sont donc pas compensés et leur comportement dipolaire reste apparent. À l'échelle macroscopique, tous les dipôles présents dans la matière s'ajoutent. En l'absence de champ externe, la somme est nulle en raison d'une répartition aléatoire. Dans le cas contraire les dipôles s'alignent sur le champ extérieur et s'ajoutent donc à celui-ci.

Contrairement au diamagnétisme, le paramagnétisme est dépendant de la température. Les matériaux paramagnétiques ne possèdent pas d'aimantation rémanente et présentent une susceptibilité faible positive (en général entre 10^{-5} et 10^{-3}) qui décroît avec l'augmentation de la température¹⁷. Le paramagnétisme affecte tous les éléments ayant un nombre impair d'électrons comme la plupart des métaux, ainsi que les composés présentant une très faible concentration de fer ou de manganèse.

2.3.3 Matériaux ferromagnétiques (sens large)

Le ferromagnétisme au sens large se traduit par la présence d'une aimantation rémanente. Ce phénomène s'explique par la présence en quantité suffisante d'éléments possédant des électrons non appariés dans les couches profondes, en général du fer ou du manganèse sous forme d'oxydes, hydroxydes ou sulfures. Ces derniers sont autant de dipôles qui s'alignent progressivement avec le champ extérieur en fonction de l'augmentation de son intensité jusqu'à une valeur de saturation (ou hystérésis) à laquelle le maximum de dipôles sont alignés. Certains dipôles sont assez proches et puissants pour s'influencer mutuellement de façon à rester alignés lors du retrait du champ externe. Ainsi, lorsqu'un tel matériau est à nouveau soumis à un champ externe, on assiste à la création d'un champ magnétique qui résulte de la somme d'une aimantation induite forte et de l'aimantation rémanente précédemment acquise.

Le ferromagnétisme est également dépendant de la température. Les matériaux ferromagnétiques présentent une susceptibilité positive forte qui aug-

17. L'agitation thermique tend à réorienter aléatoirement les dipôles.

mente avec l'augmentation de la température jusqu'à la température de Curie propre à chaque matériau. Au-delà de cette limite, l'agitation thermique est suffisante pour faire perdre l'orientation préférentielle des dipôles, le comportement devient alors paramagnétique. Lorsque l'on repasse sous cette température critique, le matériau retrouve son caractère ferromagnétique en s'alignant sur le champ magnétique ambiant.

En dessous de la température de Curie, il est également possible pour certains matériaux d'acquérir une aimantation rémanente¹⁸ : progressivement lors d'une très longue exposition à un champ externe, on parle alors d'aimantation visqueuse ; lors de phénomènes de cristallisation et dissolution de particules aimantés, on parle alors d'aimantation chimique ; ou encore lors du dépôt de nouvelles particules aimantées, on parle alors d'aimantation détritique.

2.4 Le champ magnétique terrestre

2.4.1 Définitions

Le champ magnétique terrestre est un champ naturel mesurable à la surface du globe. Mathématiquement, ce champ peut être modélisé comme l'effet d'une source dipolaire située au niveau du noyau. Les intersections entre l'axe du dipôle et la surface sont définies comme les pôles magnétiques. Ces derniers ne doivent pas être confondus avec les pôles géographiques qui correspondent aux intersections entre l'axe de rotation et la surface. Les pôles magnétiques et géographiques sont donc décalés. Les premiers tirent néanmoins leur qualité de nord et sud des derniers par pure convention, si bien que les pôles magnétiques sont inversés par rapport à ceux du dipôle terrestre (Figure 2.2). Les lignes de champs partent donc du pôle magnétique sud (nord du dipôle) vers le pôle magnétique nord (sud du dipôle). L'intensité varie entre 20 000 nT au niveau de l'équateur et 70 000 nT aux pôles, avec une valeur moyenne d'environ 50 000 nT.

18. Telford *et al.* (1990, p. 73).

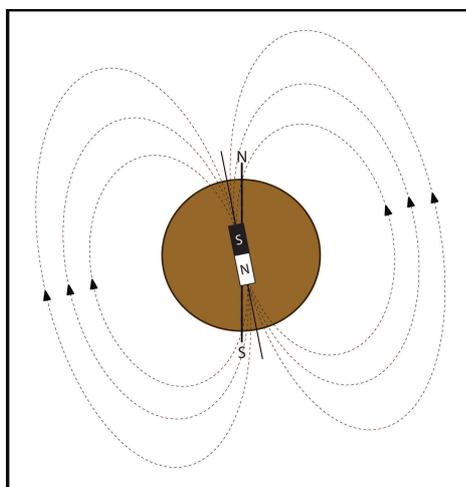


Figure 2.2 – Représentation du champ magnétique terrestre dipolaire. On y voit le décalage entre l'axe du dipôle et l'axe de rotation de la Terre ainsi que l'inversion entre pôles géographiques ou magnétiques et pôles du dipôle.

Le champ magnétique terrestre \vec{B} se caractérise en tout point de la surface du globe à l'aide de trois valeurs : **la déclinaison** D_b qui correspond à l'angle, positif dans le sens anti-trigonométrique, formé avec le nord géographique dans le plan horizontal ; **l'inclinaison** I_b qui correspond à l'angle avec le plan horizontal, positif vers le bas ; et **l'intensité** B (Figure 2.3).

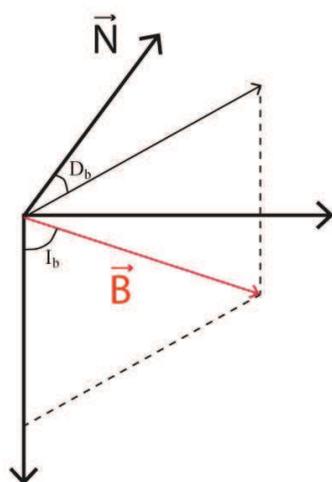


Figure 2.3 – Représentation de la déclinaison D_b et de l'inclinaison I_b du champ magnétique terrestre \vec{B} en rouge. L'intensité correspond à la norme de \vec{B} .

2.4.2 Les différentes contributions au champ

En réalité, l'origine du champ magnétique terrestre mesuré en surface est beaucoup plus complexe qu'une source dipolaire¹⁹ (Figure 2.4). En effet les courants de dynamo du noyau terrestre, qui peuvent être modélisés comme un dipôle d'axe N-S, participent à hauteur de 80 % de l'intensité totale mesurée en surface²⁰. D'autres sources internes du globe, comme les hétérogénéités de la lithosphère²¹, viennent s'ajouter à la source dipolaire principale pour constituer 99 % de l'intensité en surface. Cet ensemble constitue la partie dite stable du champ magnétique. En effet, seule une variation séculaire très lente est mesurable²². Un modèle de ce champ stable est établi à l'aide des données de stations fixes réparties sur tout le globe ; on le nomme IGRF pour *International Geomagnetic Reference Field*. Ce dernier est réévalué tous les 5 ans environ depuis 1971. La version la plus récente, IGRF-11, présente un modèle du champ de 1900 à 2015²³. Le reste de l'intensité provient de sources externes, principalement des interactions entre la Terre et le Soleil. On parle alors de partie instable du champ. En effet, celle-ci est soumise à de nombreuses variations temporelles, à la fois sous forme de cycles plus ou moins longs (de six heures à plusieurs dizaines d'années) et d'événements ponctuels (orages magnétiques)²⁴. Si les variations périodiques sont plus ou moins difficilement modélisables, les orages sont complètement imprévisibles.

Lors de la prospection magnétique, on s'intéresse à l'effet des variations spatiales d'aimantations dues aux différentes hétérogénéités de la partie superficielle du sol : les anomalies magnétiques. En général, l'amplitude de ces variations ne dépasse pas quelques dizaines de nT pour des sources archéologiques²⁵ (Figure 2.4).

19. Pour un état des connaissances sur ce sujet, voir Hulot *et al.* (2010).

20. Roy (2008, pp. 118-121).

21. Thébaud *et al.* (2010).

22. Courtillot & Le Mouél (1988, p. 389).

23. Définitif pour 1945-2005, prédictif pour le reste (Finlay *et al.* 2010, p. 1217).

24. Courtillot & Le Mouél (1988, pp. 396-416).

25. On parle ici de sources n'ayant pas subi de fortes températures. Des éléments présentant un comportement ferromagnétique (au sens large) fort, comme des fours, peuvent être à l'origine de variations jusqu'à quelques centaines de nT.

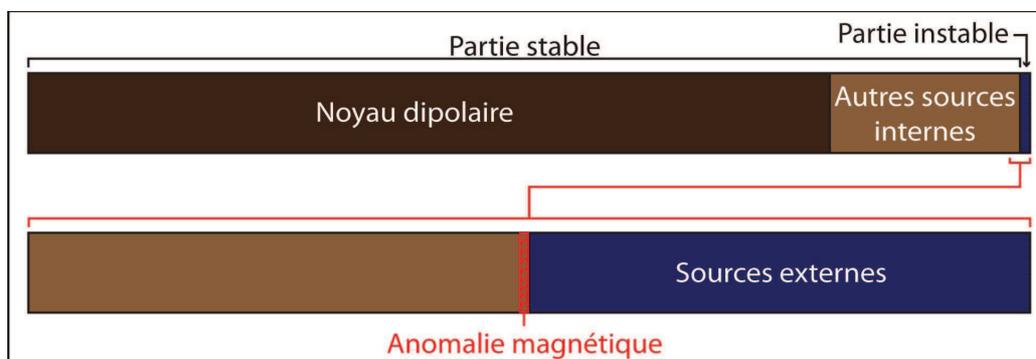


Figure 2.4 – La bande du dessus représente les différentes sources du champ magnétique terrestre, hors orages magnétiques, en fonction du pourcentage de contribution à l'intensité totale mesurée en surface. La contribution du noyau dipolaire est représentée en brun foncé, le reste des sources internes en brun clair et la partie provenant de sources externes en bleu. La deuxième bande correspond à un agrandissement des 2 % les plus à droite de la bande du dessus où est illustré en rouge le rapport entre l'intensité typique d'une anomalie et celle du champ total.

2.5 Les anomalies magnétiques

2.5.1 Anomalie vectorielle

Comme vu dans la section précédente, la prospection magnétique consiste en l'étude d'anomalies magnétiques : de très petites variations spatiales du champ dues aux variations spatiales d'aimantation créées par les hétérogénéités du sous-sol. Il est donc possible de calculer le champ d'anomalie \vec{A} comme la différence entre le champ total mesuré \vec{B} et le modèle régional \vec{R} donné par l'IGRF de la date donnée, soit

$$\vec{A} = \vec{B} - \vec{R}, \quad (2.10)$$

représentée graphiquement par la figure 2.5. Sur le terrain, il suffit donc en théorie de mesurer le vecteur \vec{B} pour calculer l'anomalie \vec{A} . Malheureusement, les capteurs à vanne de flux ne permettent pas l'acquisition à la fois rapide et précise de la direction d'un vecteur. En pratique, on mesure donc seulement la norme de \vec{B} que l'on utilise pour calculer non pas l'anomalie magnétique mais l'anomalie de l'intensité du champ magnétique.

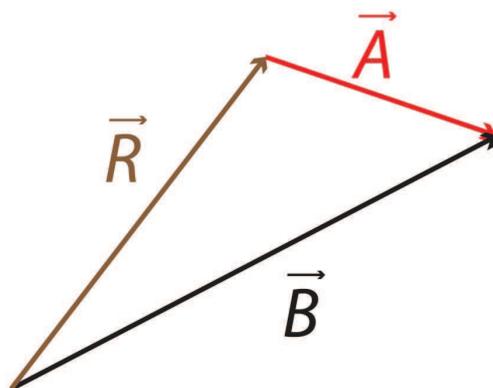


Figure 2.5 – Représentation graphique de l'équation 2.10, \vec{B} étant le champ total mesuré en noir, \vec{R} le champ régional en brun et \vec{A} l'anomalie en rouge.

2.5.2 Anomalie de l'intensité du champ magnétique

Comme énoncé précédemment, les limites du matériel de mesure nous contraignent à introduire l'anomalie de l'intensité du champ magnétique C que l'on définit comme la différence entre l'intensité du champ magnétique total facilement mesurable et celle du champ régional connue grâce aux modèles globaux, soit

$$C = \|\vec{B}\| - \|\vec{R}\|, \quad (2.11)$$

représenté graphiquement par la figure 2.6. L'anomalie C correspond donc à une valeur scalaire que l'on peut facilement obtenir grâce aux mesures de terrain. Comme vu précédemment, \vec{A} nous permet de caractériser la source de l'anomalie. L'intérêt réside donc dans la relation qui existe entre C et \vec{A} . Cette dernière peut s'obtenir en combinant les équations 2.10 et 2.11. On obtient alors

$$C = \|\vec{A} + \vec{R}\| - \|\vec{R}\|, \quad (2.12)$$

dont le premier terme du membre de droite peut s'écrire comme

$$\|\vec{A} + \vec{R}\| = \sqrt{\vec{R} \cdot \vec{R} + 2(\vec{A} \cdot \vec{R}) + \vec{A} \cdot \vec{A}}. \quad (2.13)$$

En développant ensuite les produits scalaires et en factorisant par la norme de \vec{R} , on obtient

$$\|\vec{A} + \vec{R}\| = \|\vec{R}\| \sqrt{1 + 2 \frac{\|\vec{A}\|}{\|\vec{R}\|} \cos \alpha + \frac{\vec{A} \cdot \vec{A}}{\vec{R} \cdot \vec{R}}}, \quad (2.14)$$

avec α l'angle entre \vec{R} et \vec{A} . Cette équation peut également s'écrire sous la forme

$$\|\vec{A} + \vec{R}\| = \|\vec{R}\| \sqrt{1 + 2x \cos \alpha + x^2}, \quad (2.15)$$

avec $x = \frac{\|\vec{A}\|}{\|\vec{R}\|}$, dont une approximation du polynôme de droite peut être calculée à l'aide d'un développement limité.

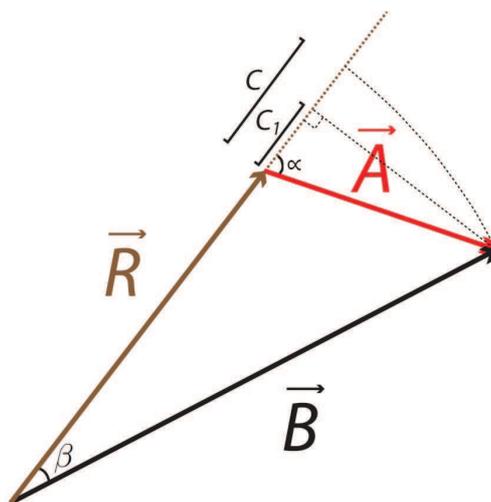


Figure 2.6 – Représentation graphique de l'anomalie de l'intensité du champ magnétique C et de son approximation au premier ordre C_1 par rapport au champ total \vec{B} , au champ régional \vec{R} et à l'anomalie \vec{A} . L'angle entre \vec{A} et \vec{R} est noté α . L'angle entre \vec{B} et \vec{R} est noté β .

2.5.3 Approximation de l'anomalie

Pour des sources archéologiques, l'intensité de l'anomalie est très petite par rapport à l'intensité du champ régional (Figure 2.4). On a alors $\|\vec{A}\| \ll \|\vec{R}\|$, ce qui signifie que $x = \frac{\|\vec{A}\|}{\|\vec{R}\|}$ tend vers zéro. On peut donc obtenir une approximation de l'équation 2.15 à l'aide d'un développement limité en zéro du polynôme $P(x) = \sqrt{1 + 2x \cos \alpha + x^2}$, ce qui donne au premier ordre

$$\|\vec{A} + \vec{R}\| \approx \|\vec{R}\| \left(1 + \frac{\|\vec{A}\|}{\|\vec{R}\|} \cos \alpha \right). \quad (2.16)$$

En remplaçant $\|\vec{A} + \vec{R}\|$ dans l'équation 2.12 par l'approximation obtenue dans l'équation 2.16 on obtient C_1 l'approximation de C au premier ordre, soit

$$C \approx C_1 = \|\vec{A}\| \cos \alpha, \quad (2.17)$$

représenté graphiquement sur la figure 2.6. On obtient donc ainsi un lien direct entre la mesure de terrain C et la norme de \vec{A} . On peut remarquer que si la mesure de C ne donne pas l'orientation exacte de \vec{A} , son signe révèle néanmoins une information directionnelle. L'approximation au premier ordre est généralement admise comme suffisante pour les anomalies géologiques²⁶. Il est cependant intéressant d'estimer cette validité dans le cadre de la prospection archéologique.

2.5.4 Discussion sur la validité de l'approximation de l'anomalie

Pour estimer la validité de l'approximation de l'anomalie on définit ΔC tel que

$$\Delta C = C - C_1, \quad (2.18)$$

qui peut également s'écrire

26. Blakely (1995, pp. 178-180).

$$\Delta C = \|\vec{B}\| (1 - \cos \beta), \quad (2.19)$$

avec β l'angle entre \vec{B} et \vec{R} . On peut dès lors remarquer que l'erreur est nulle lorsque $\beta = 0$, c'est à dire pour une anomalie due à une aimantation purement induite.

À l'aide de la loi des sinus dans le triangle formé par \vec{A} , \vec{B} et \vec{R} , on peut écrire

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{\|\vec{A}\|}{\|\vec{B}\|} \sin \alpha \right) \quad (2.20)$$

qui est maximum lorsque $\alpha = \frac{\pi}{2}$. On sait également que $\|\vec{A}\| < \|\vec{B}\|$, ce qui signifie que $\sin^{-1} \left(\frac{\|\vec{A}\|}{\|\vec{B}\|} \right) < \frac{\pi}{2}$ et donc que $\cos \beta$ est maximum lorsque β est maximum. On peut alors déduire ΔC_{max} la valeur maximale de ΔC , soit

$$\Delta C_{max} = \|\vec{B}\| \left(1 - \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{\|\vec{A}\|}{\|\vec{B}\|} \right) \right] \right) \quad (2.21)$$

qui peut également s'écrire

$$\Delta C_{max} = \|\vec{B}\| - \sqrt{\|\vec{B}\|^2 - \|\vec{A}\|^2}. \quad (2.22)$$

On peut donc déduire que pour chaque valeur de l'intensité du champ total $\|\vec{B}\|$, qui dépend de la position sur le globe, ΔC_{max} ne dépend que de $\|\vec{A}\|$. Il est alors possible de déterminer l'intervalle de ΔC_{max} en fonction de $\|\vec{A}\|$ entre les extrema de $\|\vec{B}\|$ à la surface du globe (Figure 2.7). On peut alors observer que quelle que soit la localisation, l'erreur est toujours inférieure au nano-tesla pour des valeurs de $\|\vec{A}\|$ inférieures à 200 nT, ce qui dans tous les cas est de l'ordre de la précision des capteurs. On peut donc conclure que l'approximation est assez précise pour pouvoir utiliser dans la suite de l'étude l'égalité

$$C = \|\vec{A}\| \cos \alpha. \quad (2.23)$$

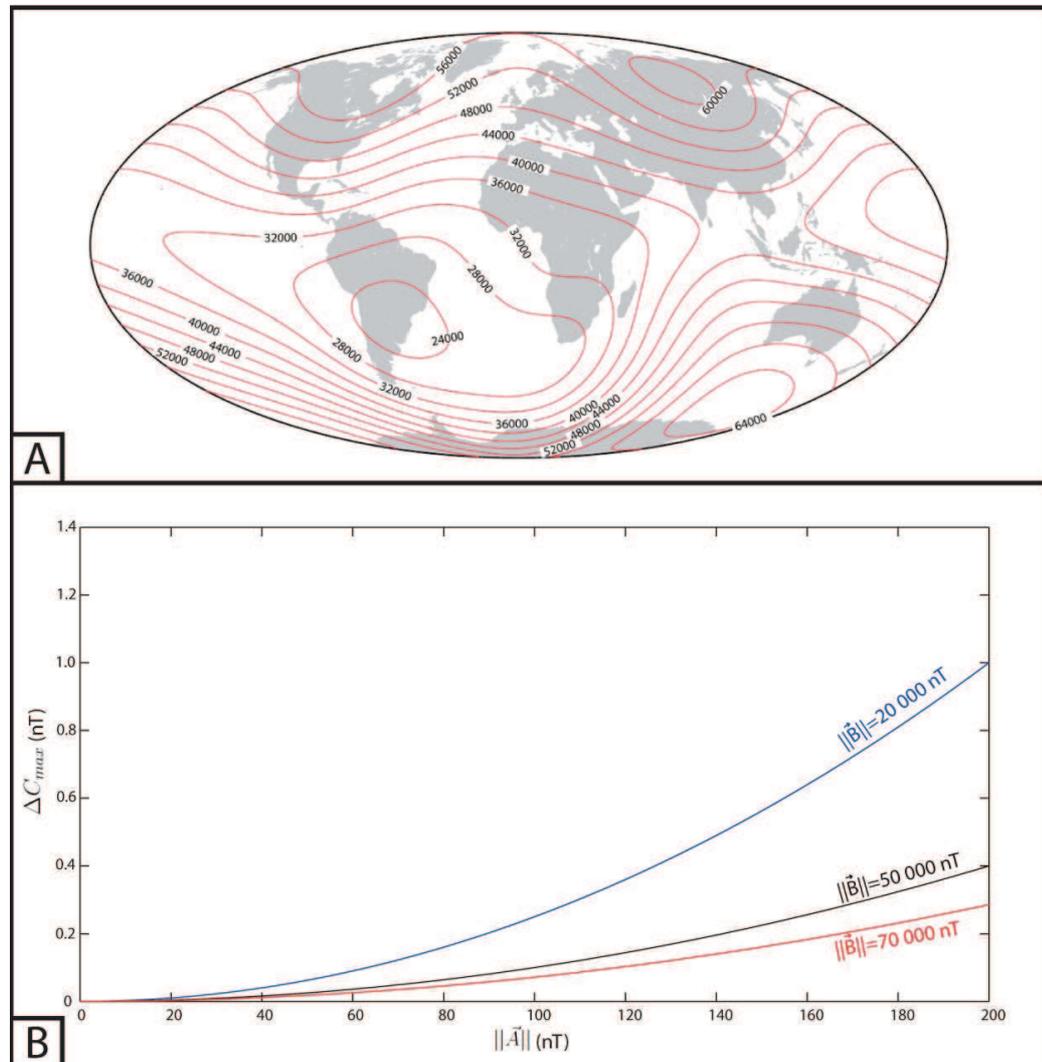


Figure 2.7 – A - Carte de l'intensité du champ magnétique à la surface du globe en 2010 d'après l'IGRF-11 (Finlay et al. 2010, p. 1224, Figure 1). B - Représentation graphique de l'erreur maximale ΔC_{max} en fonction de l'intensité du champ d'anomalie \vec{A} pour des valeurs de l'intensité totale du champ magnétique données. Les courbes rouge et bleue correspondent aux extrema du champ magnétique terrestre. La courbe noire correspond à la valeur moyenne.

Chapitre 3

Théorie du potentiel pour l'interprétation

Sommaire

3.1	Interprétation des données magnétiques	63
3.1.1	L'anomalie magnétique	63
3.1.2	Les différents types de méthodes	64
3.2	Définitions mathématiques	66
3.2.1	Système de référence	66
3.2.2	Domaine spectral	66
3.2.2.1	Définition	66
3.2.2.2	Transformée de Fourier	67
3.2.2.3	Transformée de Fourier discrète	68
3.2.2.4	Transformée de Fourier et laplacien nul	69
3.3	Modélisation	70
3.3.1	Modèle à deux dimensions	70
3.3.1.1	Calcul du potentiel	71
3.3.1.2	Calcul du champ	72
3.3.1.3	Calcul de l'anomalie	73
3.3.2	Modèle à trois dimensions	74
3.3.2.1	Calcul du potentiel	74
3.3.2.2	Calcul du champ	75
3.3.2.3	Calcul de l'anomalie	75
3.3.2.4	Volume spectral	75
3.3.2.5	Somme de dipôles	76
3.4	Inversion	78
3.4.1	Problèmes linéaires	78

3.4.2	Problèmes non-linéaires	79
3.5	Opérateurs de transformation	80
3.5.1	Prolongement	80
3.5.2	Dérivées directionnelles	81
3.5.3	Double réduction au pôle	83
3.5.4	Signal analytique - Gradient total	84
3.5.4.1	Sources à deux dimensions	84
3.5.4.2	Facteur de forme	87
3.5.4.3	Sources à trois dimensions	89
3.5.5	<i>Tilt angle</i>	90
3.5.5.1	Sources à deux dimensions	91
3.5.5.2	Sources à trois dimensions	93

Chapitre 3 : Théorie du potentiel pour l'interprétation

Le but de ce chapitre est de présenter différentes méthodes issues de la théorie des potentiels pour l'interprétation des anomalies magnétiques dans le cadre de l'étude, et, plus généralement, en contexte archéologique. Les différentes problématiques de l'interprétation des cartes d'anomalies et les différentes catégories de méthodes développées pour y répondre sont décrites dans une première partie (section 3.1). Les bases mathématiques nécessaires sont ensuite posées (section 3.2). Les principales méthodes sont finalement décrites et commentées (sections 3.3, 3.4 et 3.5).

3.1 Interprétation des données magnétiques

3.1.1 L'anomalie magnétique

Comme expliqué dans le chapitre précédent, la prospection magnétique consiste en la mesure d'un champ d'anomalies. Si ces dernières permettent d'identifier la présence de variations d'aimantation dans le sous-sol, il est difficile d'obtenir directement des informations précises sur les sources. En effet, en reprenant l'équation 2.23 de l'anomalie, on remarque que cette dernière dépend à la fois de l'intensité du champ généré par la source et de son angle avec le champ régional. Par conséquent, l'anomalie mesurée en un point donné dépend à la fois de la distance et de l'aimantation de la source. De plus, les vecteurs magnétiques n'étant pas verticaux, il est aisé de comprendre que l'anomalie présente une asymétrie, et qu'il est donc impossible d'en déduire la position horizontale précise de sa source. Ces problèmes sont illustrés par la figure 3.1. Ainsi, on se rend aisément compte que l'aplomb, la profondeur ou encore la géométrie des sources ne peuvent être directement déduits des résultats. Il est néanmoins possible d'extraire des informations supplémentaires des données à l'aide de méthodes d'interprétation développées à partir de la théorie du potentiel.

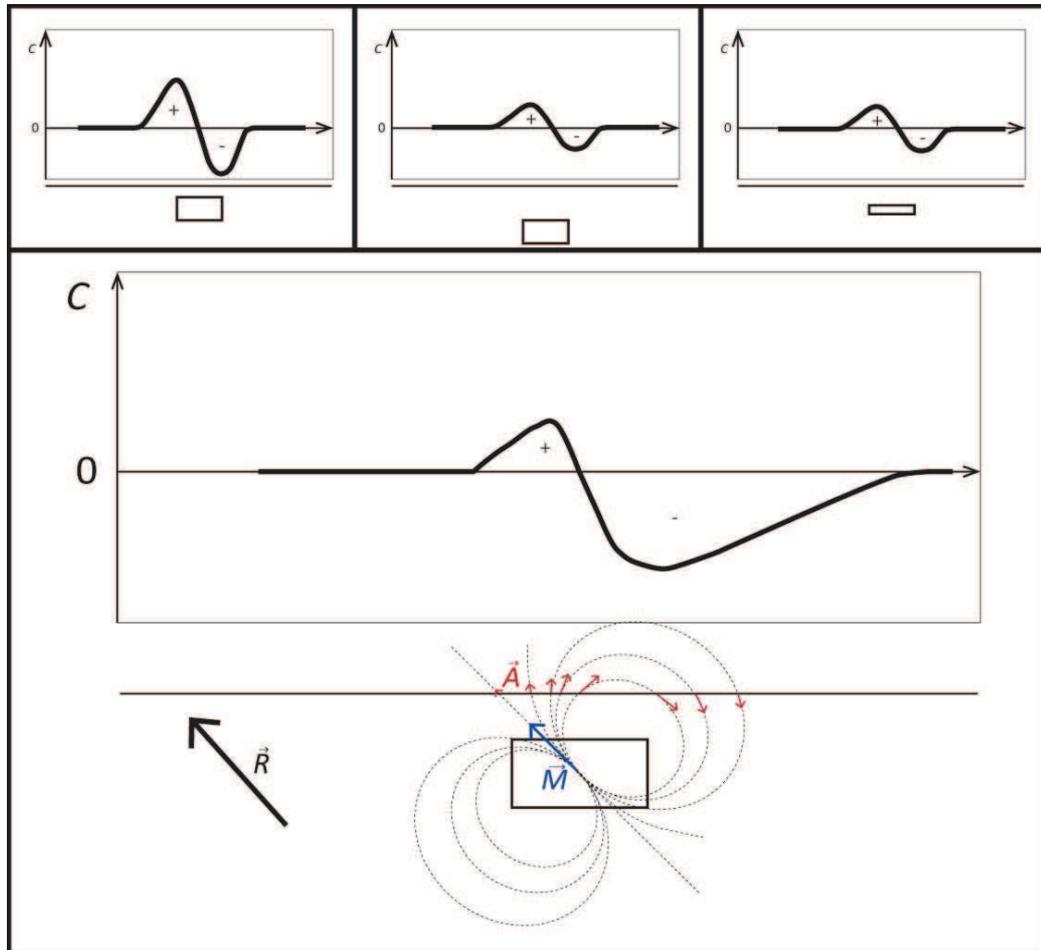


Figure 3.1 – Représentation des relations entre une source et son anomalie mesurée à la surface. Le haut illustre les variations de l'anomalie en fonction de la profondeur et du volume d'un même matériau pour des vecteurs d'aimantation et de champ régional verticaux. Le bas illustre l'asymétrie de l'anomalie dans le cas d'une aimantation \vec{M} purement induite par un champ magnétique régional \vec{R} non vertical.

3.1.2 Les différents types de méthodes

Les différentes méthodes d'interprétation peuvent être classées en trois catégories.

- **Problème direct** : le principe du problème direct est de déduire les conséquences à partir des causes. Concrètement, la méthode consiste à construire un modèle à priori des sources, de calculer l'anomalie et de

comparer le résultat aux données observées. Les paramètres du modèle peuvent ensuite être modifiés empiriquement jusqu'à ce que l'anomalie du modèle et l'anomalie mesurée soient suffisamment similaires. Cette méthode d'essai et d'ajustement a ses limites. En cas de problème complexe, le nombre d'itérations nécessaires peut rapidement devenir trop important pour être réalisé. De plus, comme toute modélisation, il peut exister plusieurs solutions à un même problème. La méthode ne donne donc pas une réponse absolue mais une possibilité parmi d'autres.

- **Problème inverse** : le but de ce type de méthode est de réaliser l'inverse du problème direct, en d'autres termes le calcul de paramètres des sources directement à partir des données observées. En général, la technique consiste à minimiser mathématiquement les erreurs entre les données observées et un modèle synthétique. La principale limite réside dans la difficulté de définir un problème bien posé dans le sens défini par Hadamard¹. La première conséquence est la non-unicité des solutions, tout comme dans le cas du problème direct.
- **Transformations** : ces techniques ne consistent pas à obtenir directement les paramètres du système mais à transformer le signal observé à l'aide d'opérateurs afin d'extraire préférentiellement certains paramètres des sources, le tout dans le but de faciliter l'interprétation. Il convient néanmoins d'être prudent : les modifications du signal peuvent faire perdre de l'information et faire baisser le rapport *signal/bruit*.

Ces trois types de méthodes sont en général complémentaires. Le signal transformé peut par exemple permettre de limiter les solutions de modélisation, tout comme le problème inverse peut être appliqué sur des données transformées afin d'estimer un paramètre en particulier.

1. Hadamard (1907).

3.2 Définitions mathématiques

3.2.1 Système de référence

Pour la suite de l'étude, on se place dans un système de coordonnées cartésiennes en trois dimensions $Oxyz$ tel que O soit l'origine, \vec{Oz} vecteur vertical dirigé vers le bas, \vec{Oy} vecteur horizontal dont la direction forme un angle α_n avec la direction du Nord magnétique, \vec{Ox} vecteur horizontal perpendiculaire à \vec{Oy} tel que \vec{Ox} forme un angle de $\alpha_n - \frac{\pi}{2}$ avec le Nord magnétique. On note également $\vec{r}(r_x, r_y, r_z)$ le vecteur de norme r entre le point de mesure P et la source S de coordonnées respectives x, y, z et x', y', z' (Figure 3.2). On a alors

$$r_x = |x - x'|, \quad (3.1)$$

$$r_y = |y - y'|, \quad (3.2)$$

$$r_z = |z - z'|. \quad (3.3)$$

3.2.2 Domaine spectral

3.2.2.1 Définition

Les processus physiques sont en général définis dans un domaine spatial ou temporel. En d'autres termes, ils correspondent à une fonction d'une variable de position ou de temps. Le domaine spectral associe quant à lui le signal à une fonction d'une variable fréquentielle (temporelle ou spatiale). Le passage d'un domaine classique à spectral se fait par le biais d'une transformée, et l'inverse se nomme tout simplement une transformée inverse. L'intérêt d'un passage entre les deux domaines réside dans le fait que des opérations compliquées dans l'un peuvent être beaucoup plus simples à réaliser dans l'autre.

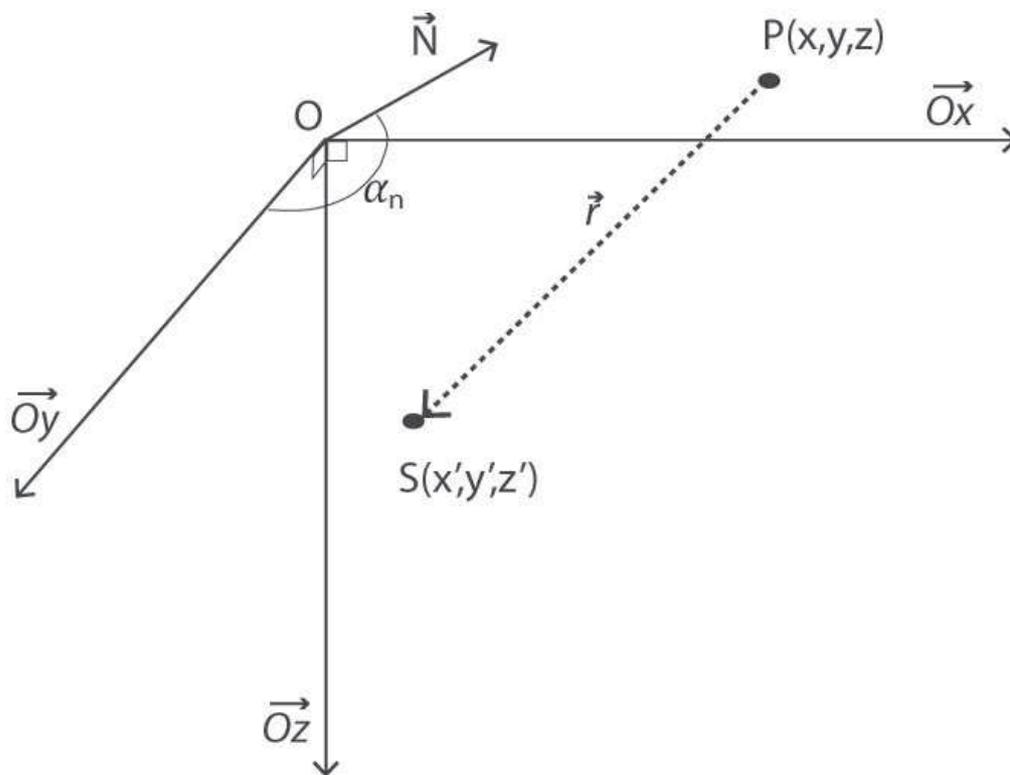


Figure 3.2 – Repère cartésien utilisé au cours de l'étude. L'angle entre le Nord magnétique et l'axe Oy est noté α_n . Le vecteur entre le point d'observation $P(x, y, z)$ et la source $S(x', y', z')$ est noté \vec{r} .

3.2.2.2 Transformée de Fourier

Dans le cadre de l'étude, le signal mesuré est celui de l'anomalie de l'intensité. Il est aisé de comprendre que ce dernier correspond à une fonction continue sur \mathbb{R} dont la variation est confinée à un intervalle fini, c'est à dire une fonction apériodique convergente. Le passage entre domaine spatial, noté $h(k)$, et spectral, noté $H(f)$, d'une telle fonction peut être réalisé à l'aide de la transformée de Fourier et de son inverse définies respectivement par

$$H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(k)e^{-2\pi ifk} dk \quad (3.4)$$

et

$$h(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(f)e^{2\pi ifk} df. \quad (3.5)$$

Pour plus de simplicité, on utilise en général la pulsation $\omega = 2\pi f$ au lieu de la fréquence. Après ce changement de variable les équations 3.4 et 3.5 deviennent

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(k)e^{-i\omega k} dk \quad (3.6)$$

et

$$h(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega)e^{i\omega k} d\omega. \quad (3.7)$$

Les équations 3.6 et 3.7 peuvent également être écrites en décomposant les variables selon les trois composantes de l'espace. En posant (x, y, z) des variables spatiales et (u, v, w) les pulsations associées, on obtient

$$H(u, v, w) = \iiint_{-\infty}^{+\infty} h(x, y, z)e^{-i(ux+vy+wz)} dx dy dz \quad (3.8)$$

et

$$h(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi)^n} \iiint_{-\infty}^{+\infty} H(u, v, w)e^{i(ux+vy+wz)} du dv dw, \quad (3.9)$$

avec $n = 3$ le nombre de dimensions. Si ces transformations peuvent être théoriquement appliquées à l'anomalie de l'intensité magnétique, ce n'est pas le cas dans la pratique. En effet, suite à l'acquisition, on ne possède pas d'information entre les points de mesure. La condition de continuité sur \mathbb{R}^n n'est donc pas remplie. Une solution à ce problème est l'utilisation de la transformée de Fourier discrète.

3.2.2.3 Transformée de Fourier discrète

L'application de la transformée de Fourier discrète repose sur deux considérations :

- L'anomalie est complètement représentée par ses échantillons. Cela signifie, selon le théorème de l'échantillonnage développé par Shannon², que la fréquence d'acquisition est au moins deux fois supérieure à la fréquence maximale du signal.
- Le signal se répète avec une période égale à l'intervalle de mesure.

2. Shannon (1949, pp. 11-12).

Ainsi on obtient un signal périodique défini sur \mathbb{R} auquel on peut appliquer les transformations de Fourier discrètes définies par

$$H(f) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k) e^{-i\omega \frac{k}{N}} \quad (3.10)$$

et

$$h(k) = \frac{1}{N(2\pi)^n} \sum_{\omega=0}^{N-1} h(k) e^{ik \frac{\omega}{N}}, \quad (3.11)$$

avec N le nombre d'échantillons. En toute rigueur, les considérations nécessaires ne sont pas applicables à l'anomalie magnétique et on obtient alors un spectre qui n'est jamais nul. Par conséquent, les anomalies dont la période est inférieure à deux fois le pas de la grille ne sont pas prise en compte. De plus, les limites de carte ou de profils n'étant pas nulles, on assiste à un seuil entre chaque répétition du signal. Diverses méthodes existent pour limiter ce problème. Dans cette étude, on propose de rajouter des profils ou grilles miroirs aux extrémités des mesures pour afin d'obtenir un signal périodique sans seuil.

3.2.2.4 Transformée de Fourier et laplacien nul

Une des propriétés des champs magnétiques est un laplacien du potentiel nul à l'extérieur des sources (équation 2.4), ce qui se traduit en spectral sous la forme

$$-(u^2 + v^2 + w^2)\varphi = 0. \quad (3.12)$$

Comme on s'intéresse au cas où φ est non nul, l'équation 3.12 admet comme solution

$$w = \pm i\sqrt{u^2 + v^2}, \quad (3.13)$$

avec i tel que $i^2 = -1$. Il est alors possible de calculer l'expression spectrale de toute fonction à trois dimensions dont le laplacien est nul à l'aide de mesures dans le plan horizontal, qui permettent de déterminer u et v et d'une transformée à deux dimensions en remplaçant w par son expression donnée par l'équation 3.13.

3.3 Modélisation

Une source de volume V et d'aimantation uniforme peut être considérée de plusieurs façons : comme un ensemble de dipôles, de charges ou de courants³. Il en découle différentes méthodes de modélisation permettant de répondre à deux cas de figure.

- **Source à deux dimensions** : en réalité section d'une structure infinie perpendiculairement au plan de modélisation. Le signal est calculé le long d'un profil d'observation. Le processus a l'avantage d'être relativement simple mais nécessite des considérations fortes.
- **Sources à trois dimensions** : beaucoup moins contraint mais plus complexe à mettre en place que la source à deux dimensions. Le signal est calculé pour un plan d'observation.

En considérant l'aimantation comme uniforme, on peut exprimer le potentiel magnétique $\varphi(x, y, z)$ d'un élément de volume de la source en combinant les équations 2.3 et 2.6 du potentiel du dipôle et de l'aimantation. On obtient alors

$$\varphi(x, y, z) = C_m \frac{\vec{M}\vec{r}}{r^3} \Delta V. \quad (3.14)$$

En posant M l'intensité de l'aimantation, I_m son inclinaison, D_m sa déclinaison, $\alpha_m = \cos(I_m) \sin(\alpha_n - D_m)$, $\beta_m = \cos(I_m) \cos(\alpha_n - D_m)$ et $\gamma_m = \sin(I_m)$, l'équation 3.14 se développe en

$$\varphi(x, y, z) = \frac{C_m M}{r^3} (\alpha_m r_x + \beta_m r_y + \gamma_m r_z) \Delta V. \quad (3.15)$$

Pour obtenir le potentiel d'une source quelconque, il suffit alors d'intégrer l'équation 3.15 sur son volume.

3.3.1 Modèle à deux dimensions

La modélisation à deux dimensions s'appuie sur la méthode développée par Talwani et Heitzler⁴. Elle est applicable pour tout objet dont la longueur

3. Blakely (1995, pp. 65-80).

4. Talwani & Heitzler (1964).

est beaucoup plus grande que la section. Cette dernière peut toujours être simplifiée par un polygone pouvant être décomposé en une somme de prismes semi-finis d'aimantation opposée (Figure 3.3).

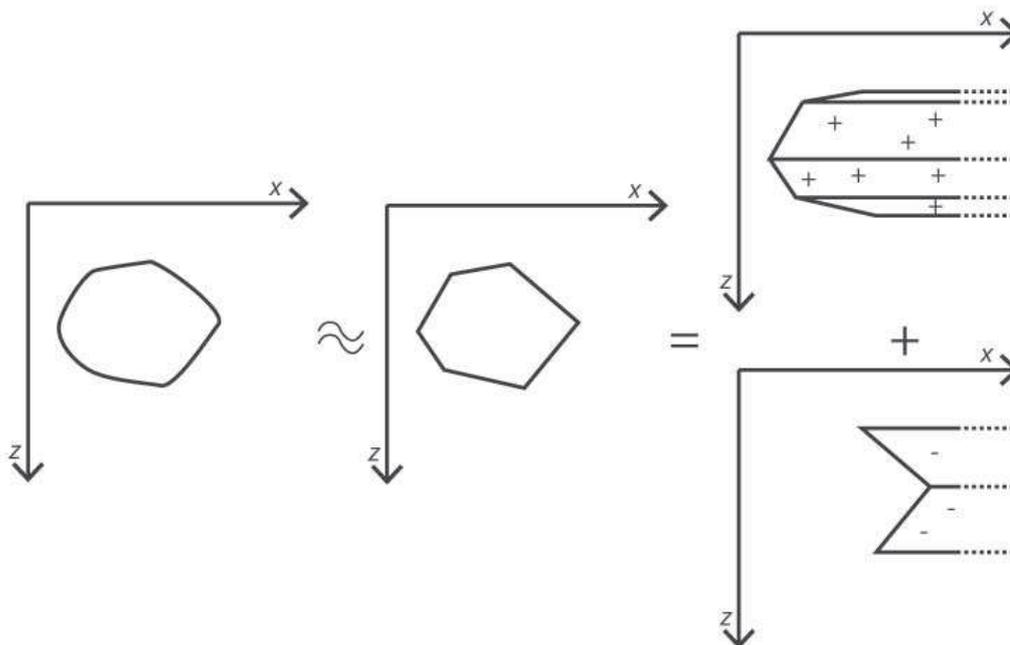


Figure 3.3 – Illustration de la section d'une source infinie selon l'axe Oy , de son approximation comme polygone ainsi que sa décomposition en la somme de combinaisons de prismes semi-finis d'aimantations opposées.

3.3.1.1 Calcul du potentiel

Le potentiel d'un prisme semi-fini peut être obtenu en intégrant l'équation 3.15 sur son volume, ce qui se fait en intégrant successivement par rapport à y' sur $[-\infty, +\infty]$, x' sur $[x, +\infty]$ et z' sur $[z_1, z_2]$ en posant $x' = x_1 + (z_1 - z') \tan \theta$ avec θ l'angle entre la verticale et la face finie du prisme (Figure 3.4), ce qui donne

$$\varphi(x, z) = C_m M \int_{z_2}^{z_1} \int_x^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\alpha_m r_x + \beta_m r_y + \gamma_m r_z}{r^3} dy' dx' dz'. \quad (3.16)$$

En résolvant l'équation 3.16, on se rend compte que le potentiel d'une telle structure tend vers l'infini. Il est néanmoins possible d'obtenir le potentiel d'une ligne infinie selon Oy de section ponctuelle en intégrant l'équation 3.15 seulement par rapport à y' sur $[-\infty, +\infty]$. On obtient alors

$$\varphi(x, z) = \frac{2C_m M}{r_v^3} (\alpha_m r_x + \gamma_m r_z), \quad (3.17)$$

avec $r_v = \sqrt{r_x^2 + r_z^2}$.

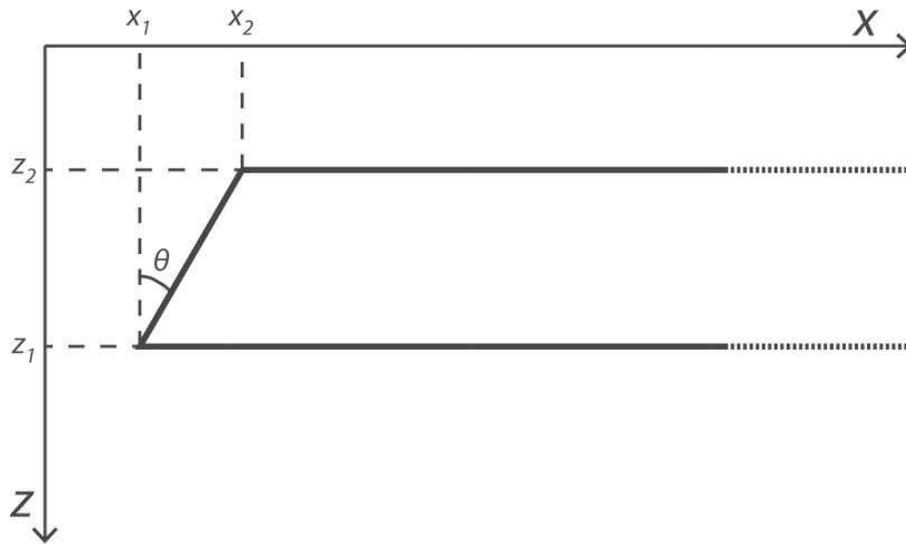


Figure 3.4 – *Prisme semi-fini avec (x_1, z_1) et (x_2, z_2) les coordonnées des extrémités de sa face finie, θ est l'angle entre cette dernière et l'axe vertical.*

3.3.1.2 Calcul du champ

Par définition, on peut calculer le champ \vec{A} de la ligne infinie de section ponctuelle à partir de son potentiel (équation 2.2). En reprenant l'équation 3.17 on obtient

$$\vec{A}(x, z) = \frac{2C_m M}{r_v^4} \begin{pmatrix} 2\gamma_m r_x r_z + \alpha_m (r_x^2 - r_z^2) \\ 2\alpha_m r_x r_z - \gamma_m (r_x^2 - r_z^2) \end{pmatrix}. \quad (3.18)$$

Le champ du prisme peut ensuite être obtenu en intégrant l'équation 3.18 par rapport à x' sur $[x, +\infty]$ et z' sur $[z_2, z_1]$, toujours avec $x' = x_1 + (z_1 - z') \tan \theta$. En posant $\vec{r}_1(r_{x_1}, r_{z_1})$ et $\vec{r}_2(r_{x_2}, r_{z_2})$ les vecteurs associés aux extrémités de la face finie et γ l'angle entre eux deux, on obtient

$$\vec{B}(x, z) = 2C_m M \cos \theta \begin{pmatrix} \alpha_m \left(\gamma \cos \theta - \sin \theta \log \frac{r_1}{r_2} \right) + \gamma_m \left(\gamma \sin \theta - \cos \theta \log \frac{r_1}{r_2} \right) \\ \alpha_m \left(\gamma \sin \theta - \cos \theta \log \frac{r_1}{r_2} \right) - \gamma_m \left(\gamma \cos \theta - \sin \theta \log \frac{r_1}{r_2} \right) \end{pmatrix}. \quad (3.19)$$

En posant Q et T deux constantes dépendantes seulement de la position du point d'observation tel que

$$Q = \cos \theta \left(\gamma \cos \theta - \sin \theta \log \frac{r_1}{r_2} \right) \quad (3.20)$$

et

$$T = \cos \theta \left(\gamma \sin \theta - \cos \theta \log \frac{r_1}{r_2} \right), \quad (3.21)$$

on peut réécrire l'équation 3.19 plus simplement comme

$$\vec{A}(x, z) = 2C_m M \begin{pmatrix} \alpha_m Q + \gamma_m T \\ \alpha_m T - \gamma_m Q \end{pmatrix}. \quad (3.22)$$

3.3.1.3 Calcul de l'anomalie

L'anomalie de l'intensité du champ magnétique revient à calculer la projection du champ du prisme sur le champ régional. En posant I_r son inclinaison, D_r sa déclinaison, $\alpha_r = \cos(I_r) \sin(D_r - \alpha_n)$ et $\gamma_r = \sin(I_r)$, l'anomalie C s'écrit

$$C = A_x \alpha_r + A_z \gamma_r. \quad (3.23)$$

En introduisant les composantes de \vec{B} données par l'équation 3.22 et en développant on obtient

$$C = 2C_m M (Q[\alpha_m \alpha_r - \gamma_m \gamma_r] + T[\alpha_r \gamma_m + \alpha_m \gamma_r]). \quad (3.24)$$

On peut alors calculer le champ et l'anomalie d'une structure polygonale en faisant la somme des contributions des différents prismes la composant à partir des équations développées dans cette section.

3.3.2 Modèle à trois dimensions

Dans le cas de sources en trois dimensions, plusieurs approches sont possibles. On peut considérer l'objet au choix comme la somme de volumes élémentaires, en général des prismes droits⁵, de faces polygonales⁶ ou de sections polygonales de plans horizontaux⁷ (Figure 3.5). L'avantage majeur de la décomposition en prismes est la possibilité de pouvoir modéliser tout type de géométrie à partir d'éléments ayant une formulation relativement simple dans le domaine spectral.

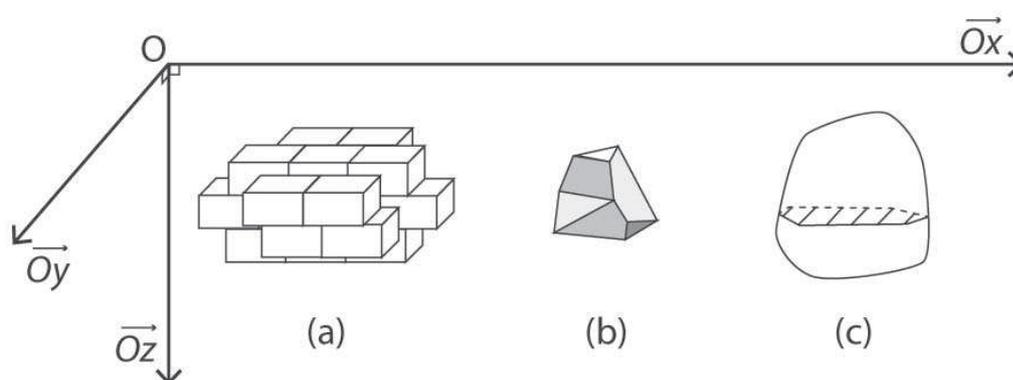


Figure 3.5 – Différentes représentations possibles d'objets en trois dimensions comme somme de (a) prismes rectangulaires, (b) faces polygonales, (c) sections polygonales de plans horizontaux.

3.3.2.1 Calcul du potentiel

L'équation 3.15 du potentiel d'un élément de volume peut également être écrite sous la forme d'une convolution de fonctions dont les représentations spectrales sont connues⁸, soit

$$\varphi(x, y, z) = -C_m M \Delta V \left[\left(\alpha_m \frac{\partial}{\partial x} + \beta_m \frac{\partial}{\partial y} + \gamma_m \frac{\partial}{\partial z} \right) * \left(\frac{1}{r} \right) \right]. \quad (3.25)$$

5. Bhattacharyya (1964).

6. Bott (1963).

7. Talwani (1965).

8. Pour la dérivation selon une direction donnée, voir la section 3.5.2. La transformée restante s'obtient en passant par une fonction modifiée de Bessel à l'ordre zéro (Bhattacharyya & Navolio 1976, pp. 636-637).

On peut alors exprimer le potentiel spectral $\hat{\varphi}(u, v, w)$ comme

$$\hat{\varphi}(u, v, w) = \frac{4\pi C_m M}{u^2 + v^2 + w^2} \hat{V}_{(u,v,w)} i(\alpha_m u + \beta_m v + \gamma_m w), \quad (3.26)$$

avec i tel que $i^2 = -1$ et $\hat{V}_{(u,v,w)}$ l'expression du volume dans le domaine spectral.

3.3.2.2 Calcul du champ

Les composantes du champ peuvent s'obtenir facilement en utilisant $\hat{\varphi}_\delta$ la dérivée de l'équation 3.26 dans la direction δ de cosinus directeurs (a, b, c) , ce qui correspond à

$$\hat{\varphi}_\delta(u, v, w) = -\frac{4\pi C_m M}{u^2 + v^2 + w^2} \hat{V}_{(u,v,w)} (au + bv + cw)(\alpha_m u + \beta_m v + \gamma_m w). \quad (3.27)$$

En introduisant l'équation 3.27 dans l'équation 2.2 qui définit le champ à partir du potentiel, on obtient l'expression spectrale du champ, soit

$$\vec{\hat{B}} = \begin{pmatrix} -\hat{\varphi}_\delta(u, v, w)|(a, b, c) = (1, 0, 0) \\ -\hat{\varphi}_\delta(u, v, w)|(a, b, c) = (0, 1, 0) \\ -\hat{\varphi}_\delta(u, v, w)|(a, b, c) = (0, 0, 1) \end{pmatrix}. \quad (3.28)$$

3.3.2.3 Calcul de l'anomalie

Le calcul de l'anomalie revient à calculer l'intensité du champ dans la direction du champ régional. On a alors

$$\hat{C}(u, v, w) = -\frac{4\pi C_m M}{u^2 + v^2 + w^2} \hat{V}_{(u,v,w)} (\alpha_r u + \beta_r v + \gamma_r w)(\alpha_m u + \beta_m v + \gamma_m w) \quad (3.29)$$

l'expression spectrale de l'anomalie générée par un élément de volume d'expression spectrale $\hat{V}_{(u,v,w)}$.

3.3.2.4 Volume spectral

Les équations précédentes peuvent être appliquées à tout type de volume dont on peut calculer l'expression spectrale. Celle d'un prisme droit qui s'étend de x_1 à x_2 ,

y_1 à y_2 et z_1 à z_2 peut s'exprimer comme la somme de deux fonctions d'Heaviside dont l'expression spectrale s'écrit⁹

$$\hat{V}_{(u,v,w)} = \frac{i}{uvw} \left(e^{-iux_1} - e^{-iux_2} \right) \left(e^{-ivy_1} - e^{-ivy_2} \right) \left(e^{-iwz_1} - e^{-iwz_2} \right) \quad (3.30)$$

3.3.2.5 Somme de dipôles

Le découpage en prismes peut s'avérer long et laborieux lorsque la géométrie de la source est complexe. Pour résoudre ce problème, il est possible d'établir une approximation du prisme par un dipôle placé en son centre. L'anomalie spectrale d'un tel dipôle peut être obtenue en remplaçant le volume spectral dans l'équation 3.29 par l'expression de la source ponctuelle $Sp_{(u,v,w)}$ qui correspond à

$$Sp_{(u,v,w)} = \frac{1}{8\pi^3} e^{-i(ux_0+vy_0+wz_0)}, \quad (3.31)$$

avec (x_0, y_0, z_0) les coordonnées du centre du prisme. On peut également réécrire l'équation 3.30 en posant L l'arrête du prisme. On a alors

$$\hat{V}_{(u,v,w)} = \frac{8e^{-i(ux_0+vy_0+wz_0)}}{uvw} \sin\left(\frac{uL}{2}\right) \sin\left(\frac{vL}{2}\right) \sin\left(\frac{wL}{2}\right). \quad (3.32)$$

On cherche donc pour quelle valeur de z_0 et L on peut écrire

$$Sp_{(u,v,w)} \approx \hat{V}_{(u,v,w)}, \quad (3.33)$$

ce qui est très compliqué à résoudre analytiquement. Il est néanmoins possible de vérifier synthétiquement pour quelle distance d'observation le prisme et le dipôle sont similaires (Figure 3.6). On note alors qu'à une distance de dix fois la largeur du prisme, l'écart type est inférieur à 0.1 %. On va alors considérer l'approximation comme bonne. Il est donc par exemple possible de modéliser une source située à 1 m de distance par des dipôles placés tous les 0.1 m. On peut ainsi calculer les cartes d'anomalies dues à des structures très complexes (Figure 3.7).

9. Bhattacharyya & Navolio (1976, pp. 637-638).

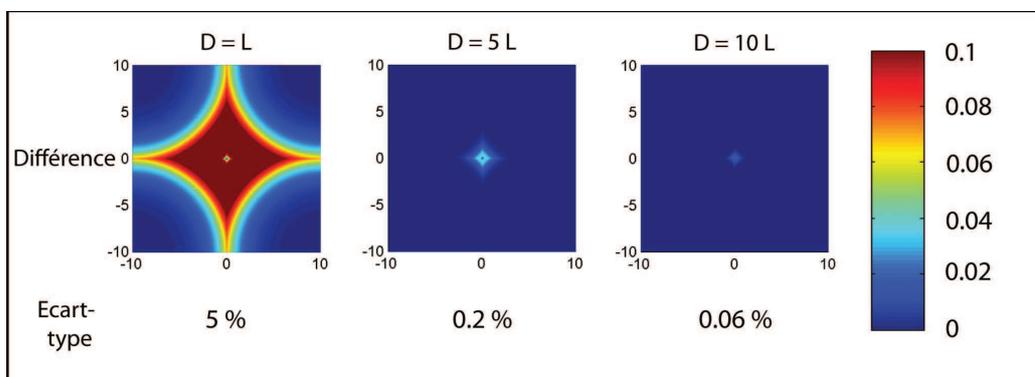


Figure 3.6 – Représentation de la différence entre les expressions normalisées de la source ponctuelle (équation 3.31) et d'un prisme droit de largeur $L = 2$ m (équation 3.32) placés en $(0,0,0)$ à trois niveaux d'observation horizontaux situés à des distances de L , $2L$ et $5L$ de la source. Les écart-types correspondants sont donnés sous chaque grille.

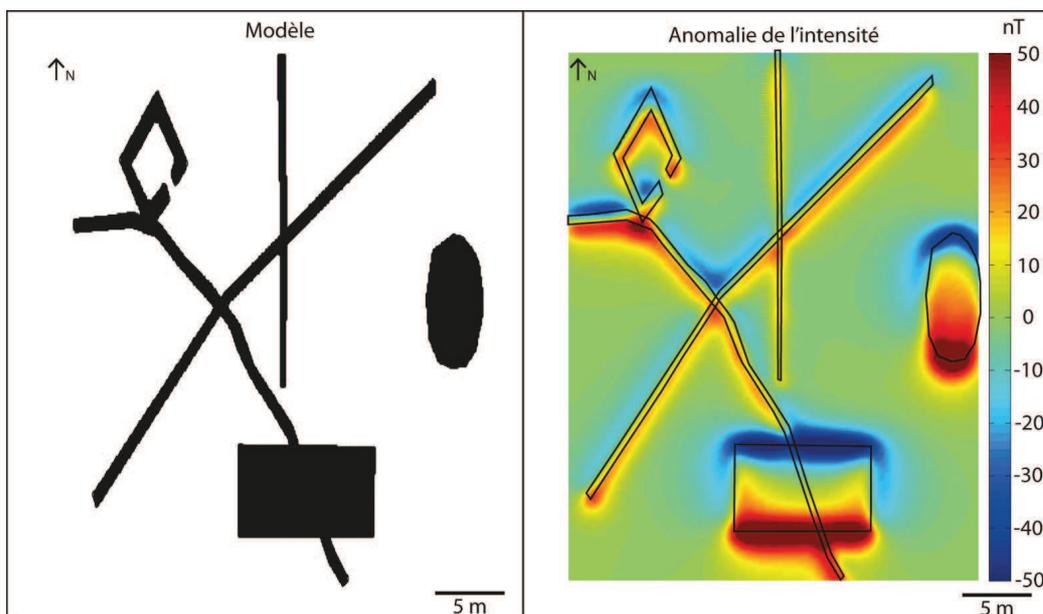


Figure 3.7 – Structures de différentes formes modélisées à l'aide de dipôles espacés de 0.1 m et carte d'anomalie calculée à 1 m au dessus des sources. Chaque point noir correspond à un dipôle. L'aimantation est considérée comme induite.

3.4 Inversion

Le but de l'inversion¹⁰ est d'obtenir les paramètres d_p d'un système à partir des données mesurées d_m . En notant G l'opérateur, linéaire ou non, qui relie les données aux paramètres, on peut écrire de façon générale

$$d_m = G(d_p). \quad (3.34)$$

Si l'on note N_m et N_p respectivement le nombre de mesures et de paramètres du système, l'équation 3.34 se résume à la résolution de N_m équations à N_p inconnues. Ces dernières permettent de classer le problème dans une des trois catégories suivantes.

- **Problème sous-déterminé** : les informations sont insuffisantes pour déterminer les paramètres, par exemple lorsqu'il y a plus d'inconnues que d'équations ;
- **Problème bien déterminé** : les informations sont suffisantes pour obtenir une solution exacte ;
- **Problème surdéterminé** : les informations sont trop nombreuses et différentes pour obtenir une solution exacte.

Dans le cadre de la prospection magnétique, les données observées sont nombreuses et soumises à des erreurs de mesure inhérentes au matériel. Le problème inverse est donc généralement surdéterminé. Il existe néanmoins différentes méthodes de résolution pour de tels systèmes. Une des plus simples et des plus rapides est celle des moindres carrés. Cette dernière permet en effet d'estimer les paramètres de problèmes, linéaires ou non, à travers deux applications légèrement différentes.

3.4.1 Problèmes linéaires

Lorsque l'opérateur G est linéaire, on a $G(d_p) = Gd_p$. Pour résoudre un tel problème, on introduit l'erreur ξ qui correspond à la différence entre les données mesurées et le modèle pour chacune des N_m équations définies par l'équation 3.34, soit

10. Pour un développement plus en détail des concepts abordés dans cette section, voir Tarantola (2005).

$$\xi = d_m - Gd_p. \quad (3.35)$$

On pose ensuite la somme S_m des carrés des erreurs du système, soit

$$S_m = \sum_{i=1}^{N_m} (d_{mi} - Gd_p)^2, \quad (3.36)$$

qu'on cherche ensuite à minimiser. Ceci s'effectue facilement en calculant les dérivées par rapport à chaque paramètre et en cherchant successivement les valeurs des différents d_p en posant les dérivées comme nulles, ce qui revient à résoudre N_p équations de la forme

$$\frac{\partial S_m}{\partial d_p} = 0. \quad (3.37)$$

On peut ainsi estimer l'ensemble des paramètres qui explique mathématiquement le mieux les données mesurées.

3.4.2 Problèmes non-linéaires

En géophysique, le problème n'est pas toujours linéaire. En effet, les dérivées définies par l'équation 3.37 peuvent être dépendantes à la fois des paramètres et des variables de l'opérateur G . La résolution traditionnelle des moindres carrés n'est alors pas applicable. Une solution réside dans la linéarisation du système à l'aide, par exemple, d'exponentielles et de logarithmes. Ce procédé n'est néanmoins pas toujours possible. On peut alors aborder la méthode des moindres carrés par un procédé itératif. En notant n l'indice et Δp le pas d'itération, on a pour chaque paramètre

$$dp^{n+1} = dp^n + \Delta p. \quad (3.38)$$

On peut alors linéariser le modèle initial localement au voisinage de dp^n à l'aide d'un développement de Taylor au premier ordre. En notant J la matrice jacobienne du système, c'est-à-dire la matrice des dérivées partielles, on obtient

$$S_m = \sum_{i=1}^{N_m} \left(dm_i - Gdp^n - \sum_{j=1}^{N_p} J_{ij} \Delta dp_j \right)^2. \quad (3.39)$$

On peut ensuite résoudre le système de la même façon que pour le système linéaire en partant de valeurs de base dp^0 jusqu'à obtenir un minimum. Plusieurs considé-

rations sont néanmoins à prendre en compte. Tout d'abord, l'équation 3.39 n'est pas forcément convergente ; elle n'admet alors pas de minimum. Ensuite, plusieurs minima locaux peuvent exister ; la solution n'est alors pas unique et on obtient seulement celle la plus proche des valeurs de départ.

3.5 Opérateurs de transformation

3.5.1 Prolongement

Les mesures magnétiques sont le plus souvent acquises dans un plan d'observation horizontal de niveau z_0 . Le but du prolongement est de calculer le comportement des anomalies à un niveau différent. Cette opération est possible si l'on peut considérer un champ régional constant et dont l'intensité est beaucoup plus grande que celle des anomalies, ce qui est généralement le cas. L'anomalie $C(x, y, z)$ satisfait alors l'équation de Laplace¹¹. En reprenant cette dernière (équation 2.4) on peut écrire

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} C(x, y, z_0) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} C(x, y, z_0) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} C(x, y, z_0) = 0, \quad (3.40)$$

qui correspond dans le domaine spectral à

$$-(u^2 + v^2)\hat{C}(u, v, z_0) + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\hat{C}(u, v, z_0) = 0, \quad (3.41)$$

avec \hat{C} l'expression spectrale de l'anomalie. On a alors affaire à une équation différentielle du deuxième ordre qui admet comme solution

$$\hat{C}(u, v, z_0) = \hat{C}(u, v, 0)e^{z_0\sqrt{u^2+v^2}}. \quad (3.42)$$

Le plan des mesures étant défini par défaut par $z = 0$, l'opérateur de prolongement s'écrit

$$e^{z_0\sqrt{u^2+v^2}}, \quad (3.43)$$

avec z_0 positif pour un prolongement vers le bas et négatif vers le haut. Il est alors facile de voir avec l'équation 3.43 que le prolongement vers le haut atténue les longueurs d'ondes, que cet effet est plus important pour les longueurs d'onde

11. Henderson & Zietz (1949, pp. 517-518).

les plus courtes, et qu'il augmente proportionnellement à $-z_0$ (Figure 3.8). Le prolongement vers le bas quant à lui produit l'effet inverse. L'opérateur de prolongement permet donc, au choix, de lisser ou d'accentuer les longueurs d'ondes les plus courtes. Le bruit enregistré par les capteurs étant également de longueur d'onde courte, un prolongement vers le bas aura par conséquent tendance à accentuer ce dernier. Il est donc aisé de comprendre qu'une mesure faite au plus proche des sources aura pour effet un enregistrement plus détaillé des longueurs d'ondes les plus courtes tout en minimisant le bruit.

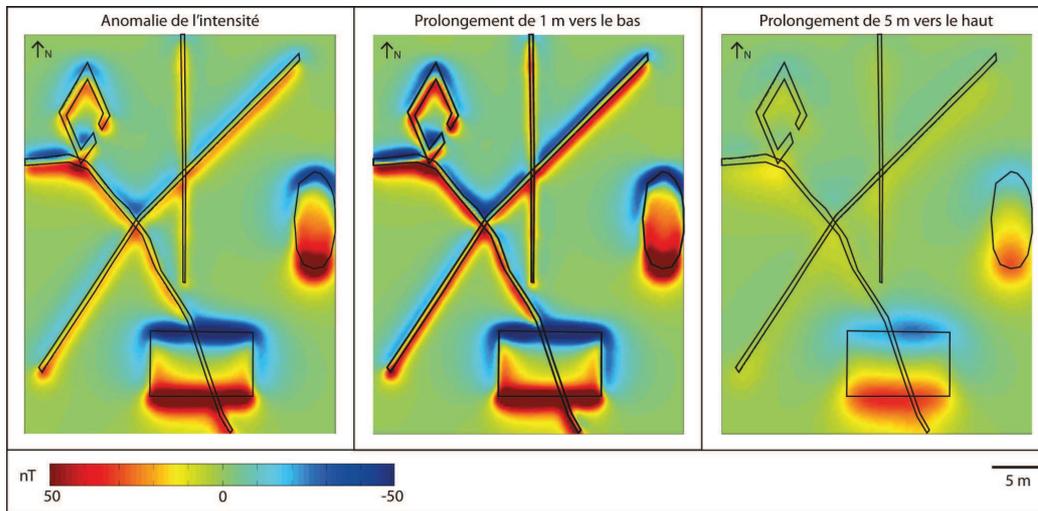


Figure 3.8 – Carte d'anomalie calculée à 1 m au dessus des sources du modèle de la Figure 3.7 et ses prolongements de 1 m vers le bas et de 5 m vers le haut.

3.5.2 Dérivées directionnelles

La dérivation selon une direction δ de l'espace dont on définit les cosinus directeurs a , b et c tel que

$$\frac{\partial}{\partial \delta} = a \frac{\partial}{\partial x} + b \frac{\partial}{\partial y} + c \frac{\partial}{\partial z}, \quad (3.44)$$

s'écrit dans le domaine spectral comme

$$\frac{\partial}{\partial D} \hat{C} = -i(au + bv + cw) \hat{C}, \quad (3.45)$$

avec i tel que $i^2 = -1$. Il est facile de voir à partir de l'équation 3.45 que l'on peut écrire

$$\frac{\partial^n}{\partial D^n} \hat{C} = -i(au + bv + cw)^n \hat{C}, \quad (3.46)$$

avec n l'ordre de dérivation si positif et d'intégration si négatif. À noter qu'il est tout à fait possible d'appliquer un ordre n fractionnaire¹². En partant du principe que le laplacien de l'anomalie est nul, on peut combiner les équations 3.13 et 3.46 pour obtenir l'opérateur de dérivation

$$\left(-i(au + bv + ic\sqrt{u^2 + v^2})\right)^n. \quad (3.47)$$

Cet outil a de nombreuses applications. La dérivée verticale a des effets comparables au prolongement vers le bas, à savoir d'accentuer les longueurs d'onde les plus courtes, ce qui amplifie également le bruit (Figure 3.9). Les dérivées horizontales, quant à elles, peuvent permettre de localiser les limites des sources, à condition que celles-ci soient verticales, suffisamment espacées et que l'anomalie soit symétrique¹³.

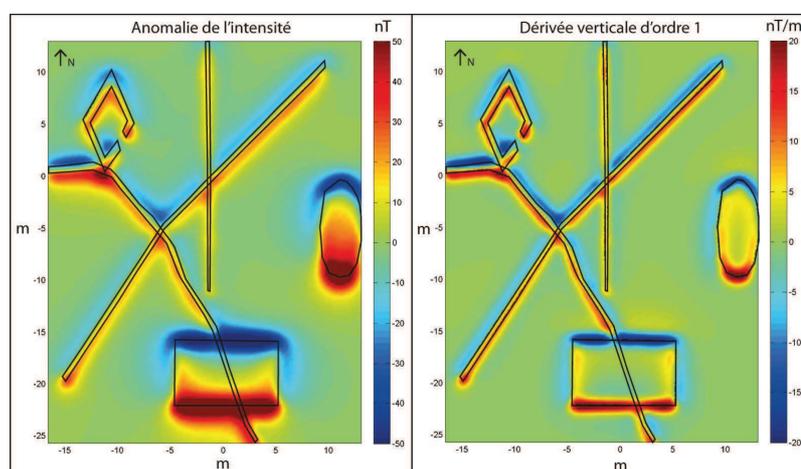


Figure 3.9 – Carte d'anomalie calculée à 1 m au dessus des sources du modèle de la Figure 3.7 et sa dérivée verticale d'ordre 1.

12. Cooper & Cowan (2003).

13. Grauch & Cordell (1987).

3.5.3 Double réduction au pôle

Comme vu précédemment, l'anomalie présente une asymétrie dépendante des directions du champ magnétique régional et de l'aimantation de la source. Il est néanmoins théoriquement possible de transformer le signal afin qu'il se comporte comme si les deux vecteurs étaient verticaux ; l'anomalie se retrouve alors symétrique avec son maximum à l'aplomb de la source¹⁴. Dans le domaine spectral, l'opération revient à intégrer l'anomalie dans la direction du vecteur à transformer pour remonter au potentiel puis à dériver verticalement¹⁵, ce qui donne l'opérateur général

$$\frac{w}{au + bv + cw}, \quad (3.48)$$

avec a , b , et c les cosinus directeurs du vecteur. En introduisant l'équation 3.13, on obtient

$$\frac{i\sqrt{u^2 + v^2}}{au + bv + ic\sqrt{u^2 + v^2}}, \quad (3.49)$$

qui peut s'appliquer à l'aimantation de la source et au champ régional. Dans la pratique, l'aimantation rémanente des sources est en général inconnue et seule la direction du champ régional est accessible. Si l'on ne réduit que ce dernier, le signal obtenu n'est pas symétrique (Figure 3.10). Il est néanmoins possible d'effectuer la transformation si l'on peut considérer que le magnétisme rémanent des sources est négligeable par rapport au magnétisme induit. La direction de l'aimantation est alors la même que celle du champ régional ; on peut alors écrire l'opérateur de double réduction au pôle

$$-\frac{u^2 + v^2}{(au + bv + ic\sqrt{u^2 + v^2})^2}, \quad (3.50)$$

avec a , b et c qui deviennent, en notant I_b et D_b inclinaison et déclinaison du champ,

$$a = \sin(\alpha_n - D_b), \quad (3.51)$$

14. Baranov (1957).

15. Bhattacharyya (1965, p. 841).

$$b = \cos(\alpha_n - D_b), \quad (3.52)$$

$$c = \sin(I_b). \quad (3.53)$$

On obtient alors une carte aux anomalies symétriques avec leur maximum au niveau de la position horizontale des sources (Figure 3.10).

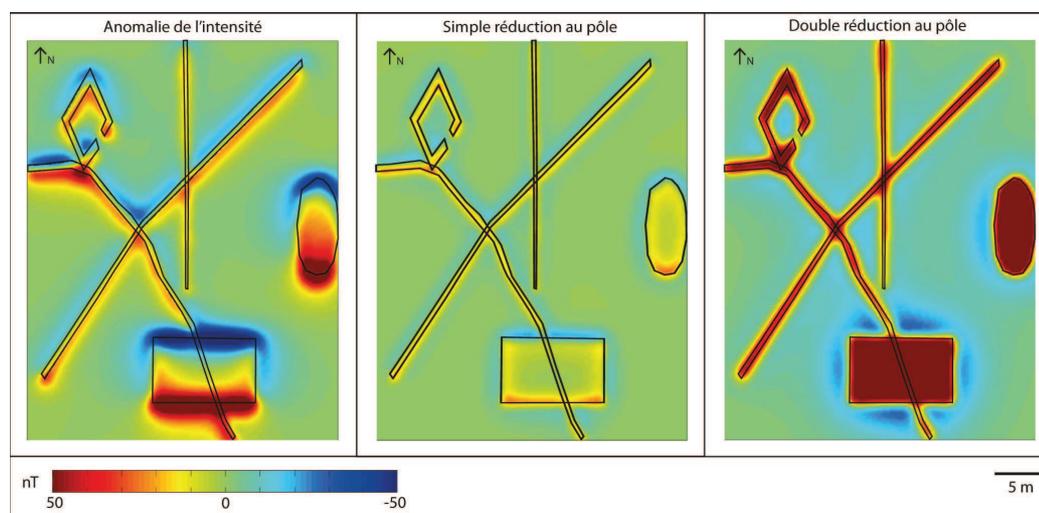


Figure 3.10 – Carte d'anomalie calculée à 1 m au dessus des sources du modèle de la Figure 3.7 et sa double réduction au pôle.

3.5.4 Signal analytique - Gradient total

Le signal analytique est une méthode populaire pour la localisation des sources magnétiques¹⁶. Il est utilisé à la fois pour des sources à deux et trois dimensions, dans le sens défini pour la modélisation¹⁷.

3.5.4.1 Sources à deux dimensions

L'opérateur est basé sur le fait que pour un prisme infini dans les deux directions positives des axes (Figure 3.11), les dérivées verticales et horizontales de l'anomalie

16. Nabighian *et al.* (2005, p. 43).

17. Rappel : la source à deux dimensions correspond à la section d'une source infinie dans l'axe perpendiculaire à cette section.

correspondent aux parties réelle et imaginaire d'un signal analytique complexe¹⁸. La norme $|SA|$ de ce dernier est donc

$$|SA| = \sqrt{\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial z}\right)^2}. \quad (3.54)$$

On utilise ensuite la fonction carrée $s(x)$ de ce signal le long d'un profil d'observation horizontal au niveau $z = 0$, r_z correspond donc à la profondeur P de la source, on a alors

$$s(x) = |SA(x)|^2 = \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial z}\right)^2 = \frac{\lambda}{P^2 + r_x^2}, \quad (3.55)$$

avec λ une constante dépendante des vecteurs d'aimantation et du champ magnétique régional. On peut voir très facilement à travers l'équation 3.55 que le signal ainsi transformé est maximum quand $x = x'$, c'est-à-dire au niveau de la position horizontale de la source, on a alors

$$s_{max} = \frac{\lambda}{P^2}. \quad (3.56)$$

Il est ainsi possible de localiser une structure sans à priori sur l'aimantation ou le champ régional. La profondeur de la source peut ensuite être obtenue à partir du rapport

$$s_r = \frac{s(x)}{s_{max}} = \frac{P^2}{P^2 + r_x^2}. \quad (3.57)$$

En isolant P dans l'équation 3.57 on obtient

$$P = \sqrt{\frac{s_r}{1 - s_r}} r_x \quad (3.58)$$

qui permet de calculer la profondeur à partir d'un point de mesure une fois la position de la source x' déterminée. On peut également en déduire que la demi-largeur de la courbe à son demi-maximum est égale à la profondeur de la source. Pour une section polygonale, il suffit, comme pour la modélisation, d'additionner les signaux de prismes de signes opposés. À noter qu'un prisme semi-fini s'obtient à partir de deux prismes infinis (Figure 3.12). La méthode permet donc d'obtenir à la fois la position et la profondeur de la source sans à priori sur l'aimantation

18. Nabighian (1972).

de celle-ci, pour peu qu'on puisse la considérer comme infinie dans la direction perpendiculaire à l'espace d'analyse.

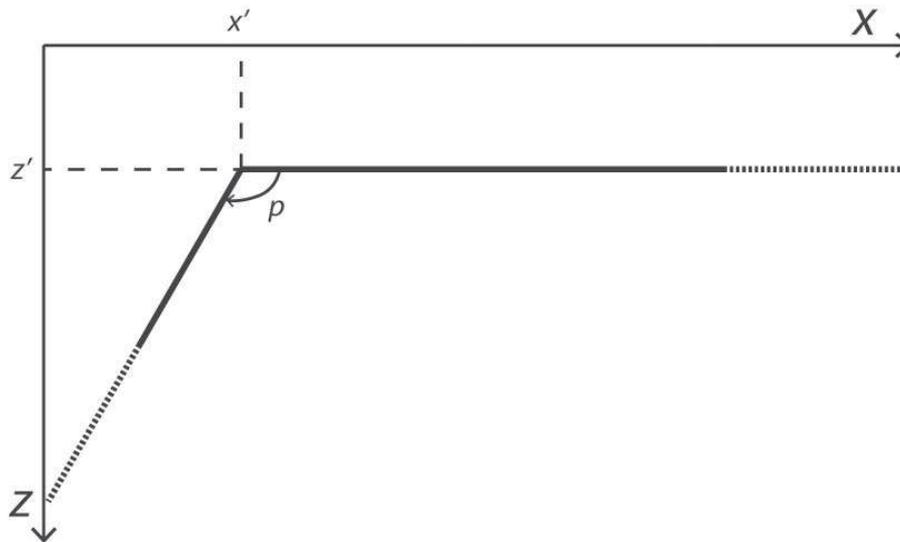


Figure 3.11 – Illustration d'un prisme infini dans les deux directions positives de l'espace dont les coordonnées sont (x', z') et le pendage p .

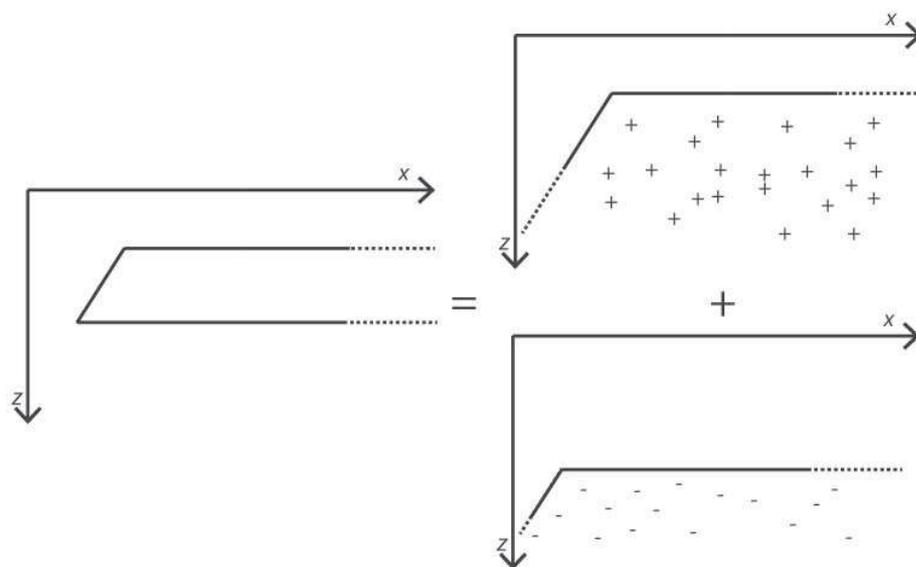


Figure 3.12 – Illustration de la décomposition d'un prisme semi-fini comme la somme de deux prismes infinis d'aimantation opposée.

3.5.4.2 Facteur de forme

La validité du signal analytique 2D est généralement admise. Pourtant, le calcul de l'anomalie de Nabighian se base sur une structure qui n'a pas de réalité physique. En effet, l'anomalie d'un prisme infini est également infini. Le problème est contourné pour les sections polygonales qui peuvent être décomposées en une somme de prismes infinis d'aimantation opposée. Cette méthode a des limites : lorsque les sommets de la section sont assez proches, le signal analytique apparent se retrouve être une combinaison des signaux des différents sommets. De plus, des structures dont l'épaisseur ou la largeur sont négligeables ne peuvent pas être obtenues à partir d'une somme de prismes infinis. L'expression de $s(x)$ de l'équation 3.55 n'a donc pas de sens pour des sources qui se comportent comme une ligne infinie ou une plaque semi-finie au regard du point d'observation. Le gradient total de telles structures peut néanmoins être calculé facilement à partir de l'équation 3.18 qui correspond au champ d'une ligne infinie, soit

$$\vec{B}_{\text{ligne}}(x, z) = \frac{2C_m M}{r_v^4} \begin{pmatrix} 2\gamma_m r_x r_z + \alpha_m (r_x^2 - r_z^2) \\ 2\alpha_m r_x r_z - \gamma_m (r_x^2 - r_z^2) \end{pmatrix}. \quad (3.59)$$

Le champ d'une plaque semi-finie et parallèle à l'axe d'observation peut s'obtenir en intégrant l'équation 3.59 par rapport à x' sur $[x, +\infty]$, ce qui donne

$$\vec{B}_{\text{plaque}}(x, z) = \frac{2C_m M}{r_v^4} \begin{pmatrix} \alpha_m r_x + \gamma_m r_z \\ \alpha_m r_z - \gamma_m r_x \end{pmatrix}. \quad (3.60)$$

En introduisant les équations 3.59 et 3.60 dans l'équation 3.23 de l'anomalie tout en posant pour plus de clarté

$$\mu = \alpha_m \alpha_r - \gamma_m \gamma_r \quad (3.61)$$

et

$$\eta = \alpha_m \gamma_r + \gamma_m \alpha_r, \quad (3.62)$$

on obtient

$$C_{\text{ligne}}(x, z) = \frac{2C_m M}{r_v^4} \left[\mu (r_x^2 - r_z^2) + 2\eta r_x r_z \right] \quad (3.63)$$

et

$$C_{plaque}(x, z) = \frac{2C_m M}{r_v^4} [\mu r_x + \eta r_z]. \quad (3.64)$$

On peut finalement calculer le gradient total g qui se calcule à partir des dérivées partielles de l'anomalie de la même façon que la norme du signal analytique (équation 3.54). On obtient ainsi le long d'un profil

$$g_{ligne}(x) = 4C_m M \frac{\sqrt{\mu^2 + \eta^2}}{(r_x^2 + P^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (3.65)$$

et

$$g_{plaque}(x) = 2C_m M \frac{\sqrt{\mu^2 + \eta^2}}{(r_x^2 + P^2)^{\frac{2}{2}}}. \quad (3.66)$$

En comparant les équations 3.55, 3.65 et 3.66, on peut écrire intuitivement une expression générale du gradient total le long d'un profil comme

$$g(x) = \frac{\lambda_n}{(r_x^2 + P^2)^{\frac{n}{2}}}, \quad (3.67)$$

avec n facteur de forme tel que $n = 1$ pour un prisme infini, $n = 2$ pour une plaque semi-finie et $n = 3$ pour une ligne infinie ; λ_n une constante dépendante de l'aimantation et du champ régional. On remarque que comme le signal analytique, l'expression 3.67 est maximale au niveau de la position horizontale de la source, on a alors

$$g_r = \frac{g(x)}{g_{max}} = \left(\frac{P^2}{P^2 + r_x^2} \right)^{\frac{n}{2}}, \quad (3.68)$$

dont on peut déduire l'évaluation de la profondeur

$$P = \sqrt{\frac{g_r^{2/n}}{1 - g_r^{2/n}} r_x}. \quad (3.69)$$

L'estimation de la profondeur est donc dépendante de la forme de la source, contrairement à celle de la localisation latérale (Figure 3.13). En effet, l'équation 3.67 présente toujours son maximum au niveau de la position horizontale de la source, quelque soit la valeur de λ_n . Ce résultat montre l'importance de bien définir son système d'analyse afin de ne pas négliger de paramètres.

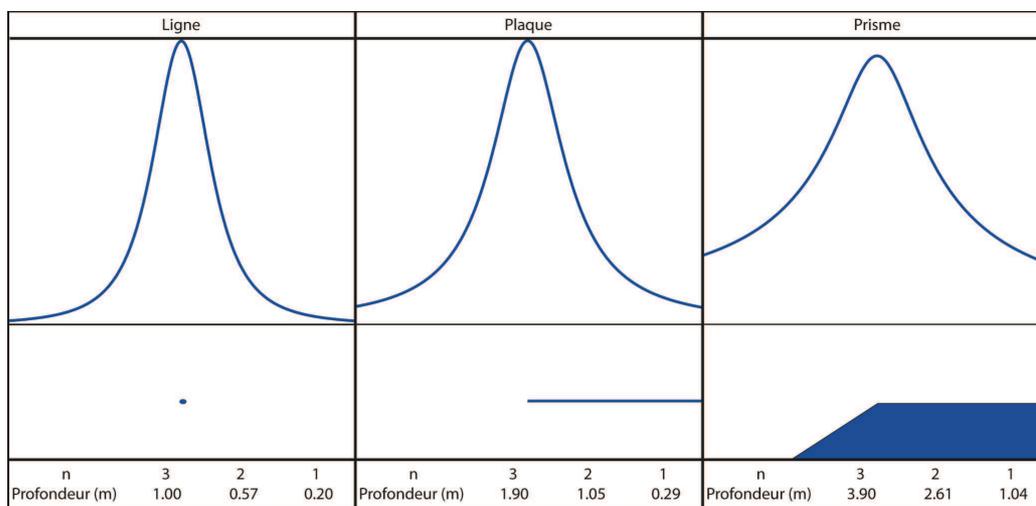


Figure 3.13 – Signal analytique 2D et profondeur obtenue par inversion en fonction du facteur de forme n pour une ligne infinie, une plaque semi-finie et un prisme infini placés à 1 m de profondeur.

3.5.4.3 Sources à trois dimensions

Pour le cas de structures en trois dimensions, l'utilisation similaire du signal analytique comme le gradient total a également été proposée¹⁹, ce qui donne

$$|SA| = \sqrt{\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial z}\right)^2}. \quad (3.70)$$

Physiquement, ce signal ne correspond pas à un signal analytique complexe comme défini dans le cas 2D et sa forme dépend de l'inclinaison de l'aimantation. Ainsi, le signal analytique 3D de sources dipolaires ou à géométrie complexe est asymétrique et son maximum ne correspond pas à la position horizontale des sources²⁰ (Figure 3.14). Par exemple, l'écart entre la position horizontale d'un dipôle et le maximum de son signal analytique 3D peut atteindre jusqu'à 30 % de la distance entre la source et le plan d'observation pour une inclinaison de trente degrés²¹. L'estimation de la profondeur peut alors être réalisée à l'aide du ratio entre le

19. Roest *et al.* (1992).

20. Linping *et al.* (1997) ; Salem *et al.* (2002).

21. Salem *et al.* (2002, pp. 232-234).

signal analytique et le signal analytique à l'ordre supérieur²², soit

$$P = 4 \frac{|SA|^n}{|SA|^{n+1}}, \quad (3.71)$$

avec $n = 1$ l'ordre de dérivation. La profondeur ainsi obtenue présente une erreur maximum de 8 %²³. Une autre solution proposé dans cette étude consiste à délimiter une zone autour du maximum du signal analytique et d'y réaliser une inversion. En effet, le signal analytique d'un dipôle va dépendre de son aimantation et de sa position. L'estimation des six paramètres (les trois composantes de l'aimantation et des trois coordonnées spatiales) est alors possible à travers la résolution d'un problème inverse non-linéaire par itération, comme décrit dans la section 3.4.2, page 79.

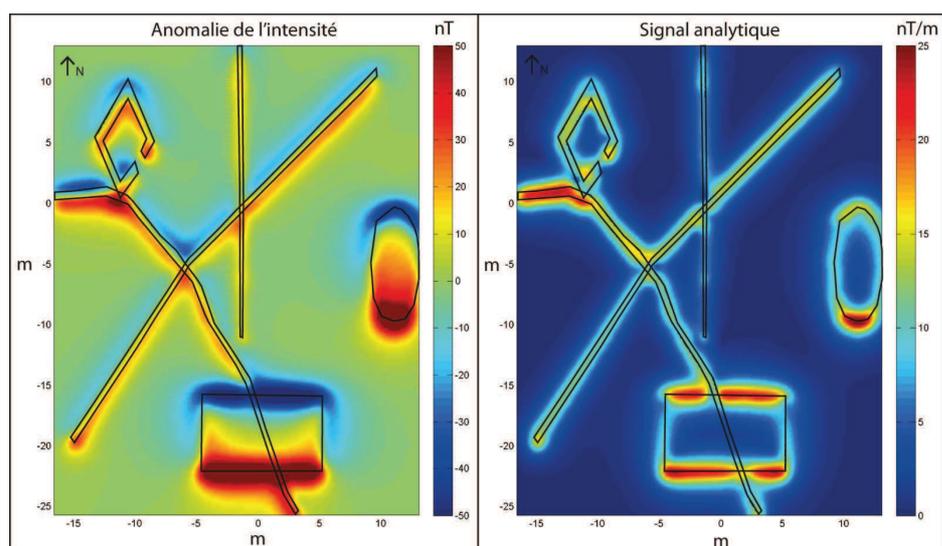


Figure 3.14 – Carte d'anomalie calculée à 1 m au dessus des sources du modèle de la Figure 3.7 et son signal analytique 3D.

3.5.5 *Tilt angle*

Parmi les autres opérateurs de transformation disponibles, le *tilt angle* peut sembler intéressant en contexte archéologique. Ce dernier est défini comme l'arc

22. Salem *et al.* (2002, p. 235, équation 17).

23. Salem *et al.* (2002, pp. 234-235).

tangente du rapport entre le gradient vertical et le gradient horizontal de l'anomalie double réduite au pôle²⁴, soit

$$TILT = \arctan \left(\frac{\partial C}{\partial z} / \frac{\partial C}{\partial h} \right), \quad (3.72)$$

avec

$$\frac{\partial C}{\partial h} = \sqrt{\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial y}\right)^2}. \quad (3.73)$$

L'utilisation de l'arc tangente permet d'obtenir des valeurs comprises entre -90° et 90° tandis que l'utilisation du rapport de dérivées permet de ne pas être sensible à l'amplitude de l'anomalie, et donc de ne pas subir un effet d'échelle entre les sources profondes et superficielles. Le *tilt* est ainsi, selon Miller et Singh²⁵, positif au dessus de la source, négatif à l'extérieur, et passe par zéro à la position horizontale, ou proche, de ses bords. Il existe aujourd'hui différents opérateurs dérivés du *tilt* qui permettent de faire ressortir préférentiellement certains paramètres²⁶. Il est également possible d'estimer la profondeur des sources à partir de la distance entre certains contours du *tilt*²⁷. Ces affirmations sont en réalité dépendantes de la géométrie de la source étudiée : par exemple, la valeur nulle du *tilt* ne correspond pas à la position horizontale d'un contact présentant un pendage²⁸. Pour mieux comprendre ses limites, les équations du *tilt* peuvent être calculées pour différentes géométries de sources en deux et trois dimensions.

3.5.5.1 Sources à deux dimensions

Il est aisé de calculer le *tilt* des différentes géométries définies pour le facteur de forme du signal analytique, à savoir $n = 3$ pour la ligne infinie, $n = 2$ pour la plaque semi-finie et $n = 1$ pour le prisme infini. Dans tous les cas, on se trouve en présence d'une anomalie double réduite au pôle. On peut donc écrire

$$I_m = I_r = -90, \quad (3.74)$$

24. Miller & Singh (1994, pp. 213-214).

25. Miller & Singh (1994, p. 215).

26. Pour une revue des différents opérateurs, voir Cooper & Cowan (2006).

27. Salem *et al.* (2007).

28. Salem *et al.* (2007, p. 1502).

ce qui signifie que

$$\alpha_m = \alpha_r = 0 \quad (3.75)$$

et

$$\gamma_m = \gamma_r = -1. \quad (3.76)$$

En introduisant ces valeurs dans les équations 3.63 et 3.64 de l'anomalie de la ligne et de la plaque, on obtient pour les anomalies double réduite au pôle

$$C_{n=3}(x, z) = -2C_m M \frac{r_x^2 - r_z^2}{(r_x^2 + r_z^2)^2} \quad (3.77)$$

et

$$C_{n=2}(x, z) = -2C_m M \frac{r_x}{(r_x^2 + r_z^2)^2}. \quad (3.78)$$

Il est ensuite aisé de calculer les dérivées partielles de chacune de ces équations et de les introduire dans l'équation 3.72 du *tilt*, avec $\partial C/\partial h = \partial C/\partial x$. On obtient alors

$$TILT_{n=3}(x) = \arctan \left(\frac{-r_z(3r_x^2 - r_z^2)}{r_x(3r_z^2 - r_x^2)} \right) \quad (3.79)$$

et

$$TILT_{n=2}(x) = \arctan \left(\frac{-4r_z r_x}{r_z^2 - 3r_x^2} \right). \quad (3.80)$$

De la même manière, on peut calculer le *tilt* du prisme infini à partir des dérivées partielles de son anomalie données par Nabighian²⁹. On obtient alors

$$TILT_{n=1}(x) = \arctan(-\cot p), \quad (3.81)$$

avec p le pendage du prisme (Figure 3.11). On peut alors voir à partir des équations 3.79, 3.80 et 3.81 qu'au niveau de la position horizontale de la source, c'est à dire quand r_x est nul, le *tilt* est bien nul pour une plaque ou un prisme droit. En revanche, il est dépendant du pendage pour tout autre type de prisme et peut prendre des valeurs de $\pm 90^\circ$ pour une ligne de dipôle (Figure 3.15). Pour cette dernière, on retrouve également une valeur de $\pm 90^\circ$ pour $r_x = r_z/\sqrt{3}$. Il est alors très difficile d'utiliser le *tilt* pour localiser les sources sans à priori fort sur leur géométrie.

29. Nabighian (1972, p. 509, équations 2 et 3).



Figure 3.15 – Tilt angle d'une ligne infinie, d'une plaque semi-finie et d'un prisme infini placés à 1 m de profondeur.

3.5.5.2 Sources à trois dimensions

Comme vu précédemment, il est compliqué de calculer l'anomalie due à des sources de géométrie complexe à trois dimensions. Pour pallier à cela, on décompose les sources en sommes de dipôles dont on peut calculer l'anomalie plus facilement. Dans le domaine spatial, on peut obtenir le champ d'un dipôle en combinant et développant les équations générales 2.2 du champ et 2.3 du potentiel. On a alors

$$\vec{A}(x, y, z) = \frac{C_m m}{r^5} \begin{pmatrix} 3r_x(r_x\alpha_m + r_y\beta_m + r_z\gamma_m) - r^2\alpha_m \\ 3r_y(r_x\alpha_m + r_y\beta_m + r_z\gamma_m) - r^2\beta_m \\ 3r_z(r_x\alpha_m + r_y\beta_m + r_z\gamma_m) - r^2\gamma_m \end{pmatrix}. \quad (3.82)$$

On peut ensuite calculer l'anomalie qui est la projection du champ de la source sur le champ régional. Après double réduction au pôle, les deux vecteurs sont verticaux, on a alors

$$C(x, y, z) = \frac{C_m m}{r^5} (3r_z^2 - r^2), \quad (3.83)$$

dont on peut facilement calculer les dérivées partielles

$$\frac{\partial C}{\partial x} = 3C_m m r_x \frac{r_x^2 + r_y^2 - 4r_z^2}{(r_x^2 + r_y^2 + r_z^2)^{7/2}}, \quad (3.84)$$

$$\frac{\partial C}{\partial y} = 3C_m m r_y \frac{r_x^2 + r_y^2 - 4r_z^2}{(r_x^2 + r_y^2 + r_z^2)^{7/2}} \quad (3.85)$$

et

$$\frac{\partial C}{\partial x} = -3C_m m r_z \frac{3r_x^2 + 3r_y^2 - 2r_z^2}{(r_x^2 + r_y^2 + r_z^2)^{7/2}}. \quad (3.86)$$

On obtient alors pour le *tilt*, en posant $r_h = \sqrt{r_x^2 + r_y^2}$ pour plus de simplicité,

$$TILT_{3D}(x, y, z) = \arctan \left(\frac{-r_z(3r_h^2 - 2r_z^2)}{r_h(r_h^2 - 4r_z^2)} \right). \quad (3.87)$$

On peut donc voir qu'à la position horizontale du dipôle, c'est à dire quand $r_h = 0$, le tilt prend une valeur de $\pm 90^\circ$. Cette valeur se retrouve également pour $r_h = 2r_z$. De plus, le *tilt* d'une forme quelconque ne correspond pas en réalité à la somme des *tilts* des dipôles mais plutôt à l'arc-tangente du ratio des dérivées de l'anomalie de la somme des dipôles. Le *tilt angle* est donc très délicat à utiliser pour des sources dipolaires à trois dimensions, voire inutilisable dans le cas de géométries complexes (Figure 3.16).

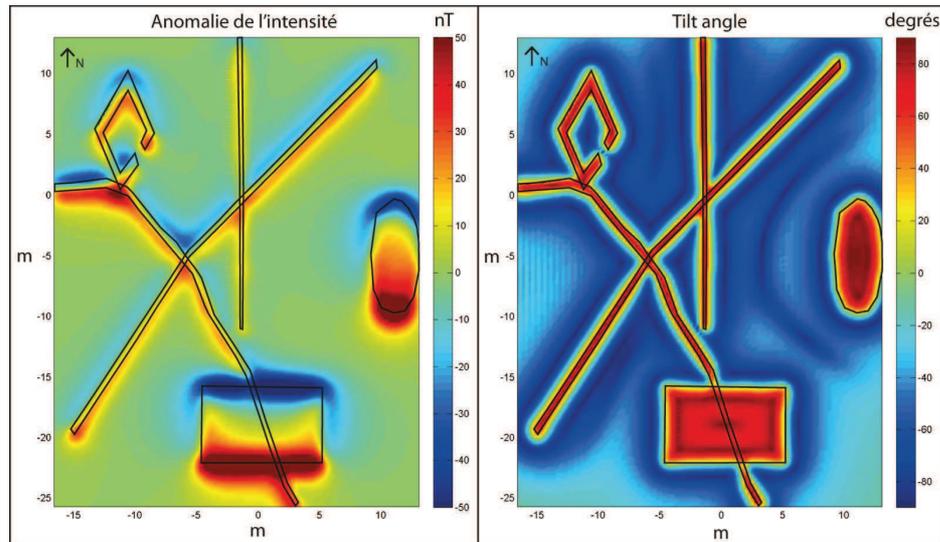


Figure 3.16 – Carte d'anomalie calculée à 1 m au dessus des sources du modèle de la Figure 3.7 et son tilt angle.

Chapitre 4

La prospection magnétique

Sommaire

4.1	Mise en Œuvre	97
4.1.1	Dispositifs	97
4.1.1.1	Électronique centrale	98
4.1.1.2	Dispositif à capteurs portés	99
4.1.1.3	Dispositif à capteurs traînés	101
4.1.1.4	Dispositif pour parois verticales	102
4.1.2	Traitement des données	102
4.1.2.1	Étalonnage et compensation	103
4.1.2.2	Correction de la dérive temporelle	105
4.1.2.3	Calcul de l'anomalie	106
4.1.2.4	Calcul de la grille d'anomalie	107
4.1.2.5	Représentation de la grille	108
4.2	Acquisition	109
4.2.1	Étalonnage	110
4.2.2	Correction de la dérive temporelle	112
4.2.3	Calcul de l'anomalie	113
4.2.4	Positionnement	115
4.2.5	Égalisation sur grille	115
4.3	Résultats	116
4.3.1	Cartes d'anomalies	116
4.3.1.1	Dispositif à capteurs portés	116
4.3.1.2	Dispositif à capteurs traînés	120
4.3.2	Comparatif	120

Chapitre 4 : La prospection magnétique

Le but de ce chapitre est de présenter le processus complet permettant de passer du concept méthodologique proposé à l'obtention de cartes de l'anomalie. L'exposé débute par l'explication de la mise œuvre de l'idée de départ, de la conception des différents prototypes aux traitements du signal nécessaires à leur bon fonctionnement (section 4.1). L'acquisition sur le terrain est ensuite décrite avec ses différentes contraintes et les solutions qui y sont apportées (section 4.2). Les cartes d'anomalie sont finalement présentées et discutées afin d'obtenir une première interprétation et une comparaison méthodologique avec le matériel plus traditionnel (section 4.3).

4.1 Mise en Œuvre

La mise en œuvre de la prospection magnétique sur le terrain passe par la mise au point de différents dispositifs d'acquisition et de traitements du signal afin d'obtenir des cartes d'anomalies magnétiques du sous-sol.

4.1.1 Dispositifs

Afin de répondre aux problématiques, trois types de dispositifs ont été mis au point, chacun dans le but de remplir un objectif particulier.

- **Dispositif à capteurs portés** : développé dans un souci de rapidité de couverture de terrain par un unique opérateur, afin de cartographier le plus exhaustivement possible le site de *Qasr 'Allam*.
- **Dispositif à capteurs traînés** : développé dans une optique de précision maximale pour caractériser le plus finement possible les vestiges de zones ciblées à l'aide du dispositif à capteurs portés.
- **Dispositif pour parois verticales** : développé afin de cartographier verticalement les différentes parois (murs et bermes), après les fouilles ciblées, dans le but d'obtenir des informations en trois dimensions des structures étudiées.

Tous ces dispositifs reposent sur le même principe appliqué à différentes échelles et possèdent donc de nombreuses caractéristiques et parties communes :

- des magnétomètres à vanne de flux (*Bartington Mag-03 MC70*) qui permettent de faire l'acquisition du champ total ;
- un système de positionnement afin de pouvoir localiser précisément les données magnétiques dans l'espace ;
- une électronique centrale pour numériser, stocker et diffuser en temps réel à la fois les données magnétiques et de localisation ainsi que pour alimenter les composants ne possédant pas de batteries propres ;
- une interface visuelle optionnelle afin d'observer les données en temps réel.

4.1.1.1 Électronique centrale

Deux versions successives conçues par l'E.O.S.T. ont été mises en place lors de cette étude (figure 4.1) :

- **Phase 1** : mise en œuvre en 2012 et 2013, elle est composée d'un numériseur 19 bits pouvant acquérir simultanément les données de un à quatre magnétomètres à une fréquence de 30 Hz et d'une antenne *GNSS*¹ à une fréquence d'acquisition de 1 Hz . Les données ainsi obtenues sont enregistrées sur une carte mémoire (*SD*). L'alimentation se fait à l'aide d'une batterie au plomb étanche (12V, 7Ah). Le système possède une télécommande permettant de démarrer et d'arrêter l'acquisition ainsi que de placer un repère à n'importe quel moment dans le fichier d'enregistrement. La lecture et la diffusion en temps réel sont assurées par un mini-PC indépendant. Le tout pèse environ 6.5 kg et a une autonomie d'environ trois heures.

1. Les systèmes de positionnement par satellite ou *GNSS* désignent de façon générique les systèmes de navigation satellitaire utilisant un seul ou une combinaison des réseaux américain (*GPS*), russe (*GLONASS*), européen (*Galileo*) et chinois (*Beidou*). Dans le cadre de l'étude seul le réseau *GPS* est utilisé.

- **Phase 2** : mise en œuvre en 2014, elle est composée d'un numériseur 24 bits pouvant acquérir simultanément les données de un à huit magnétomètres à une fréquence de 1 à 300 Hz et de 2 antennes *GNSS* à une fréquence de 1 à 10 Hz . Le système comprend également un ordinateur embarqué, afin de stocker, lire et diffuser les données en temps réel ainsi que de faciliter le développement. Deux ports *USB* alimentés permettent d'y ajouter d'autres périphériques tels un clavier et une souris. Un port *VGA* assure la sortie vidéo. L'alimentation se fait à l'aide d'une batterie au Lithium-ion (15V, 6.6Ah). Le tout pèse environ 4 kg et a une autonomie d'environ six heures.

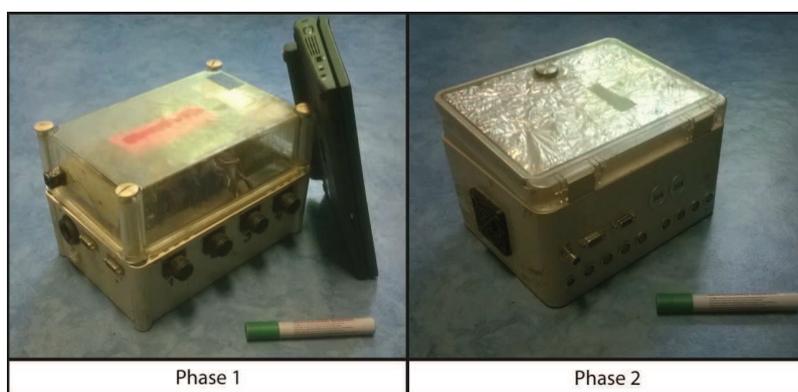


Figure 4.1 – Versions successives de l'électronique centrale (Bruno Gavazzi).

4.1.1.2 Dispositif à capteurs portés

Le dispositif à capteurs portés a été conçu pour maximiser la surface couverte par session de mesures. Il est composé des parties suivantes qui s'articulent autour d'une claie de portage (figure 4.2).

- L'acquisition des données magnétiques est assurée par quatre à huit magnétomètres à vanne de flux (modèle *Bartington Mag-03 MC70²*) qui sont placés tous les 0.5 m de part et d'autre d'une perche en aluminium. Cette dernière est attachée à une claie de portage de façon à ce que les capteurs se retrouvent alignés en position fixe horizontalement devant l'opérateur.

2. Fiche technique en annexe B, page 167.

- L'acquisition des données de positionnement est réalisée à l'aide d'une antenne *GPS* (modèle *Trimble 5800*) fixée sur le dessus de la claie de portage.
- L'électronique centrale est attachée à l'arrière de la claie.
- L'interface visuelle consiste en une paire de lunettes à écran (*Head Mounted Display ou HMD*).

Avec une telle configuration, l'opérateur suit des routes parallèles espacées de 2 m à l'aide du guidage *GPS* diffusé dans les lunettes. On obtient ainsi des profils magnétiques géo-référencés tous les 0.5 m. La distance entre les capteurs et le sol, modulable, est en générale mise à 1 m. Il n'est alors pas nécessaire, comme avec les appareils conventionnels, d'utiliser un carroyage ou un alignement préparé au préalable. À l'aide d'un tel dispositif, un opérateur seul est capable de couvrir 5000 à 12000 m² par heure de mesure en fonction de la praticabilité du terrain.

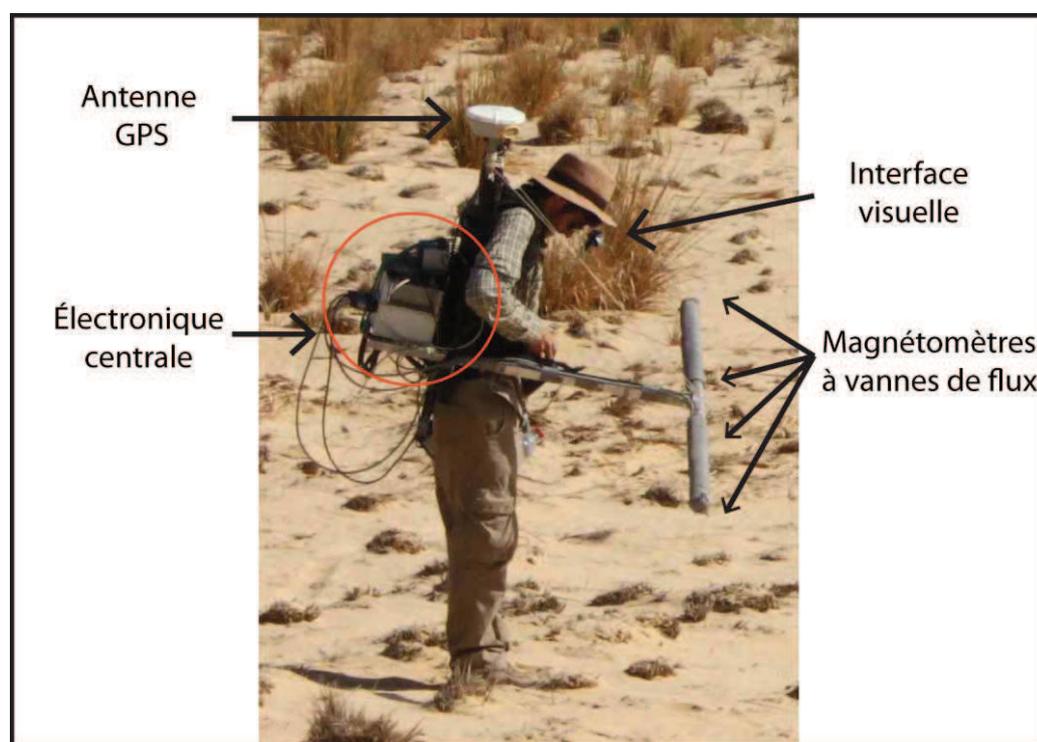


Figure 4.2 – Dispositif à capteurs portés (Frédéric Colin).

4.1.1.3 Dispositif à capteurs traînés

Le dispositif à capteurs traînés a été conçu pour obtenir la plus grande précision possible sur des zones repérées avec un dispositif à capteurs portés. Il est composé des parties suivantes sur la base d'une plate-forme plastique (figure 4.3).

- L'acquisition magnétique se fait à l'aide de quatre à huit magnétomètres à vanne de flux placés horizontalement tous les 0.1 m à l'intérieur d'une plaque de polystyrène. Cette dernière est placée à une des extrémités de la plate-forme.
- L'électronique centrale est déposée à l'autre extrémité de la plate-forme.
- Une antenne *GPS* est fixée dans la zone de l'électronique centrale pour relever le positionnement.

Le dispositif ne possède pas d'interface visuelle et nécessite deux opérateurs. Le premier tire la plate-forme sur le sol en suivant des trajectoires parallèles espacées de 0.5 m, tandis que le deuxième sert de guide en s'aidant de marques au sol ou de repères à distance. Dans cette configuration, deux opérateurs sont capables d'obtenir des profils magnétiques tous les 0.1 m en étant au plus près possible des sources magnétiques.

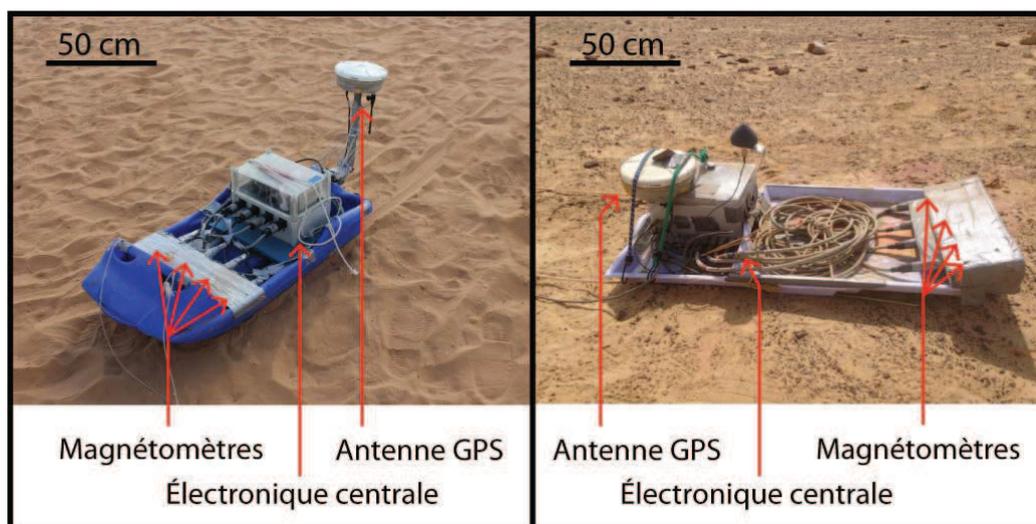


Figure 4.3 – Dispositifs à capteurs traînés (Bruno Gavazzi).

4.1.1.4 Dispositif pour parois verticales

Le dispositif pour mesures sur parois a été spécialement conçu pour mesurer dans un plan vertical les anomalies des murs et bermes mis au jour par les fouilles archéologiques. Le fonctionnement est le suivant (figure 4.4).

- L'acquisition magnétique se fait à l'aide de quatre à huit magnétomètres à vanne de flux placés dans une plaque de polystyrène avec un espacement de 0.1 m (configuration similaire au dispositif à capteurs traînés). La plaque est déplacée perpendiculairement à l'objet mesuré en longeant celui-ci de haut en bas à vitesse constante. L'opération est répétée afin d'obtenir des profils magnétiques tous les 0.1 m sur toute la paroi.
- Le positionnement n'est pas réalisé à l'aide d'une antenne *GPS* mais par le second opérateur qui va placer des repères grâce à la télécommande de l'électronique à des intervalles de distance réguliers en s'aidant de décamètres fixés aux parois.

Ce dispositif est le seul permettant de mesurer dans un plan vertical les anomalies générées par les structures étudiées. Ces dernières, combinées aux mesures horizontales, apportent des informations sur les sources d'anomalies dans les trois dimensions.

4.1.2 Traitement des données

Les systèmes d'acquisition présentés dans la section précédente permettent d'enregistrer des données brutes sous la forme d'une liste où chaque mesure est inscrite successivement : pour les données magnétiques, on obtient l'intensité dans les trois directions orthogonales pour chaque magnétomètre ; pour les données *GNSS* on obtient la longitude, la latitude et l'altitude dans le système géodésique mondial standard (WGS84). Afin d'obtenir des cartes d'anomalies magnétique, tous ces résultats doivent passer par des étapes de traitement successives. Dans le cadre de l'étude, on utilise l'environnement de développement *Matlab* développé par la société *The MathWorks* pour réaliser cette tâche.

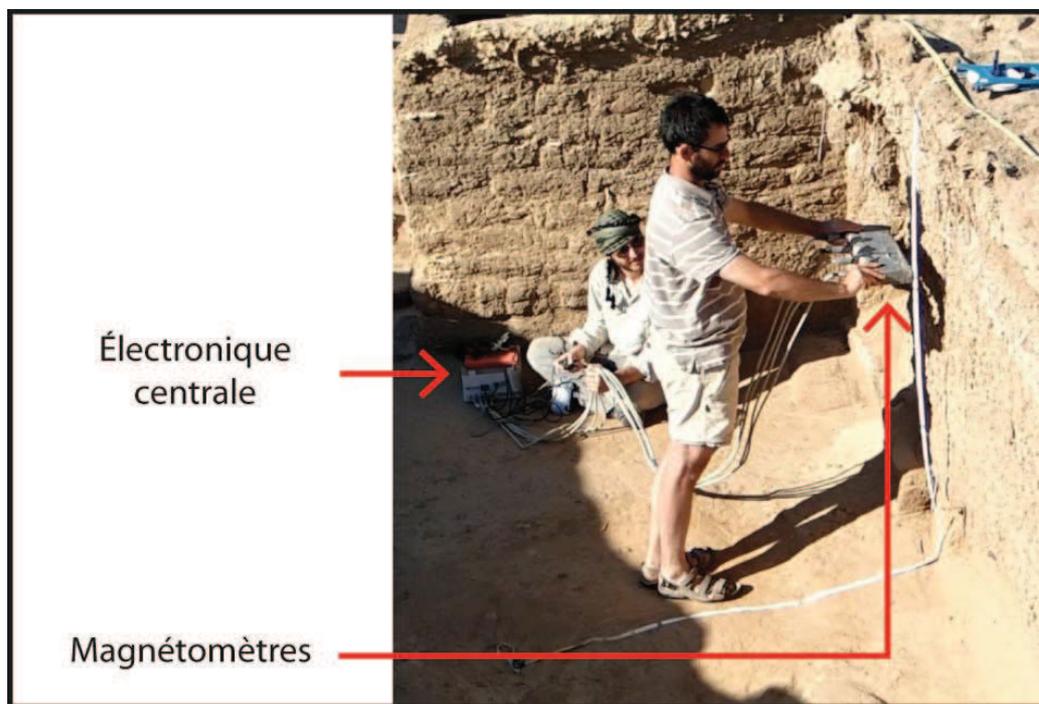


Figure 4.4 – Dispositif de mesure de parois (Frédéric Colin).

4.1.2.1 Étalonnage et compensation

Étalonnage

Les magnétomètres à vanne de flux sont très peu utilisés en prospection magnétique au sol principalement à cause du fait que ce sont des instruments de mesure relative peu précis. En effet, deux capteurs donneront des enregistrements très différents pour le même point de mesure. Ce problème peut néanmoins être résolu par un étalonnage, qui consiste à calculer des corrections à appliquer à chaque sonde directionnelle de chaque magnétomètre. On note trois types de corrections.

- **Décalage** : les sondes présentent un décalage de leur valeur d'origine ; le constructeur donne ± 5 nT.
- **Sensibilité** : les sondes ne varient pas exactement comme les variations du champ ; le constructeur donne une erreur inférieure à 0.0015%.
- **Orthogonalité** : les angles entre les trois sondes ne sont pas exactement droits ; le constructeur donne une erreur inférieure à 0.5° .

Différentes solutions pour corriger ces erreurs ont été proposées par des groupes travaillant avec le même type de magnétomètres en prospection spatiale. Ces dernières consistent à faire pivoter l'appareil dans toutes les directions autour d'un point où le champ magnétique est connu et considéré comme constant. Les variations enregistrées sont donc seulement dues aux erreurs des capteurs et peuvent être corrigées mathématiquement. Pour cela on utilise la méthode développée pour l'étalonnage du satellite *Ørsted*³ qui consiste en une minimisation des différences entre les données mesurées et supposées par la méthode des moindres carrés. On peut ainsi passer d'un écart-type de plusieurs dizaines de nT à moins d'un nT (figure 4.5). Concrètement, sur le terrain, la procédure d'étalonnage consiste en la rotation du dispositif de mesure autour d'un point fixe tout en l'inclinant dans le plan vertical jusqu'à 45° successivement d'un côté puis de l'autre.

Compensation

Une autre source de perturbations magnétiques provient du dispositif lui-même. En effet, la plupart des composants (batteries, électronique, antennes, etc.) possèdent une aimantation. Ce problème bien connu en prospection aérienne peut être divisé en trois types d'aimantation à compenser.

- **Magnétisme rémanent** : invariant, il s'exprime comme un vecteur constant qui s'additionne au champ magnétique terrestre. L'effet est donc le même que celui d'un décalage sur les capteurs et est ainsi corrigé par l'étalonnage.
- **Magnétisme induit** : parallèle au champ magnétique terrestre, son effet varie seulement avec l'attitude des magnétomètres, tout comme les erreurs d'orthogonalité. L'étalonnage corrige donc également ces perturbations.
- **Courants de Foucault** : le déplacement d'éléments conducteurs en présence d'un champ magnétique est à l'origine de courants électriques dits de Foucault, et donc de champs magnétiques liés. L'effet est pro-

3. Olsen *et al.* (2003).

proportionnel à la vitesse de déplacement, aux variations du champ ambiant et au volume d'éléments conducteurs interconnectés.

Dans le cadre de la prospection au sol, on considère la vitesse de déplacement et la taille des parties conductrices du dispositif assez faibles pour que l'effet des courants de Foucault soient négligeables face aux anomalies dues aux hétérogénéités du sous-sol. La compensation de l'aimantation du matériel de mesure est alors assurée par la procédure d'étalonnage.

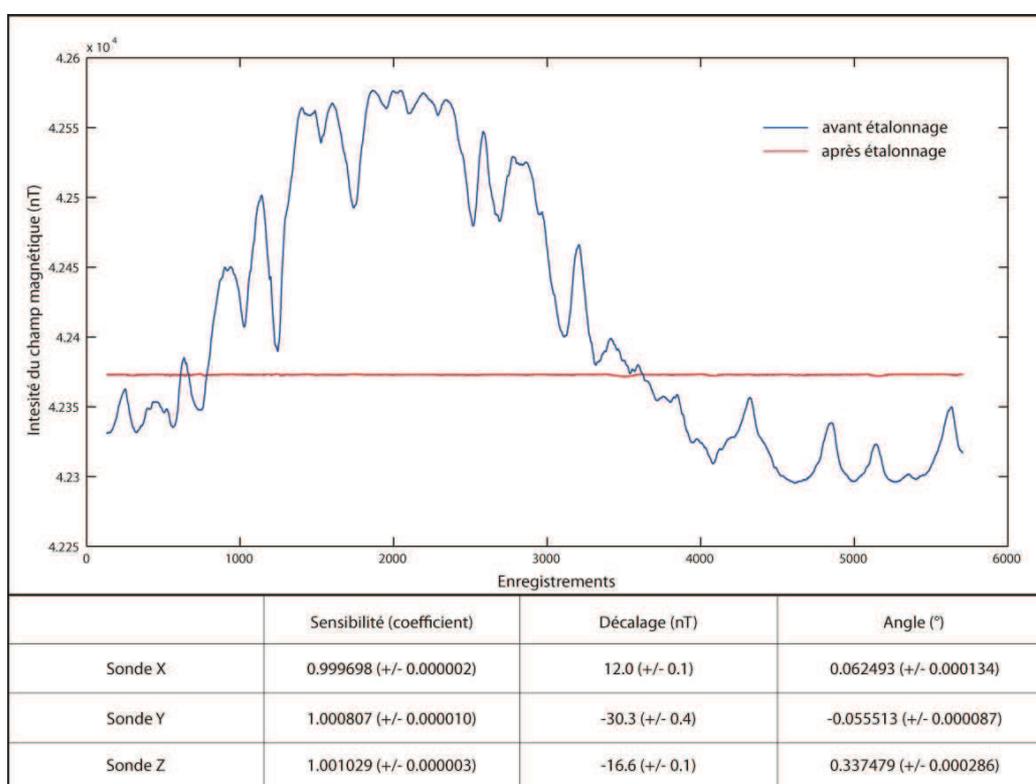


Figure 4.5 – Représentation de l'étalonnage du magnétomètre 4 lors de la prospection du 30 avril 2012. En bleu et rouge, les enregistrements autour d'un point fixe avant et après l'étalonnage. Les différentes corrections appliquées pour passer d'un écart-type de plus de 95 à 0.3 nT sont présentées au bas de la figure.

4.1.2.2 Correction de la dérive temporelle

Contrairement à la gradiométrie, la mesure du champ total prend en compte des variations à la fois spatiales et temporelles du champ. Ces der-

nières sont dues à la fois à la partie instable du champ et à la dérive linéaire des capteurs causée par la température. En effet, le constructeur donne un décalage de $\pm 0.1 \text{ nT}/^\circ\text{C}$ et une variation de sensibilité de $\pm 0.0015 \text{ \%}/^\circ\text{C}$. Sur le site, à l'échelle de la session de mesure, de l'ordre de l'heure, l'effet des variations cycliques et de la dérive des capteurs peut être en général considéré comme linéaire. Les variations non régulières à cette échelle peuvent être d'origine solaire (orages magnétiques) ou anthropique. Si les premières sont assez peu fréquentes pour pouvoir être évitées, les perturbations humaines sont plus problématiques. On peut donc proposer deux solutions pour corriger les variations temporelles en fonction de la présence ou non de perturbations magnétiques ne pouvant pas être considérées comme linéaires.

- **Milieu calme** : les variations temporelles sont corrigées à l'aide des mesures d'observatoire et la dérive thermique est corrigée à l'aide des données du constructeur et de capteurs de température internes aux magnétomètres. Lorsque l'observatoire le plus proche est trop éloigné, on effectue une régression linéaire entre des mesures faites au même point au début et à la fin de la session. On peut également utiliser le même processus à partir d'étalonnages afin de corriger au mieux les variations de sensibilité liées à la température.
- **Milieu perturbé** : on pose un capteur fixe dédié à l'enregistrement des variations temporelles que l'on corrige ensuite. Cette technique ne fonctionne que s'il est possible de considérer que les perturbations sont uniformes sur toute la zone de mesure.

À noter qu'à *Qasr 'Allam*, on évolue dans la périphérie extérieure d'un centre urbain qui correspond à un milieu calme.

4.1.2.3 Calcul de l'anomalie

L'approximation de l'anomalie de l'intensité du champ magnétique est définie comme la différence entre le champ total mesuré sur le terrain et le champ régional. Ce dernier est obtenu en prospection aérienne ou satellite à l'aide de l'*IGRF*. À l'échelle des mesures au sol, ce modèle est en général trop peu précis du fait d'une résolution trop faible et de la non prise en compte

de la géologie locale. On a donc besoin d'estimer le champ régional à partir des mesures. Pour cela, on utilise deux méthodes différentes en fonction du dispositif utilisé.

- **Médiane sur profil** : la méthode consiste à soustraire à chaque profil sa médiane. La validité de l'approximation augmente avec le ratio de la longueur des profils sur l'intensité des anomalies. Une anomalie spatialement incomplète perturbe également l'estimation du champ régional. Le désavantage de cette technique est de ne pas prendre en compte les variations du champ perpendiculaires aux profils. Ces dernières peuvent conduire à l'apparition d'un effet de nivellement dû à un décalage entre ces derniers. Cette technique n'est utilisée que pour la mesure sur parois. En effet, on estime la surface suffisamment petite pour considérer le champ régional comme invariant.
- **Points de croisement** : la méthode consiste à mesurer les différences de l'intensité du champ entre les profils d'acquisition et des profils transversaux. Des constantes à appliquer à chaque profil pour minimiser ces différences sont ensuite calculées à l'aide d'un problème inverse en posant la somme des constantes comme nulle. Ainsi, les variations du champ magnétique régional dans les deux dimensions du plan horizontal sont prises en compte.

4.1.2.4 Calcul de la grille d'anomalie

Lors de la représentation spatiale des données, plusieurs effets pouvant perturber l'interprétation sont à prendre en compte. Tout d'abord, les magnétomètres ainsi que le numériseur sont à l'origine d'un bruit sur les profils, majoritairement blanc, qui est proportionnel au mouvement des capteurs⁴. De plus, la densité de données est dépendante de la direction (selon la fréquence d'échantillonnage le long des profils et selon l'espacement perpendiculairement à ceux-ci). Afin de ne pas être dépendant de ces facteurs, on va chercher à représenter les données sur une grille de pas régulier, que l'on définit en général comme la moitié de la distance entre les capteurs. Pour

4. Munsch *et al.* (2007, pp. 171-174).

cela, on utilise une fonction *Matlab* développé par *John D'Errico* : *gridfit*⁵. Cette dernière permet d'éliminer le bruit blanc et de contrôler l'atténuation des longueurs d'onde les plus courtes. On détermine également une valeur de lissage, qui correspond au nombre de pixels autour de chaque nœud qui prendront la même valeur que celui-ci. Si un pixel est affecté par plusieurs nœuds, on calcule une combinaison des contributions. On obtient ainsi une grille dont les nœuds sont uniformément répartis (Figure 4.6).

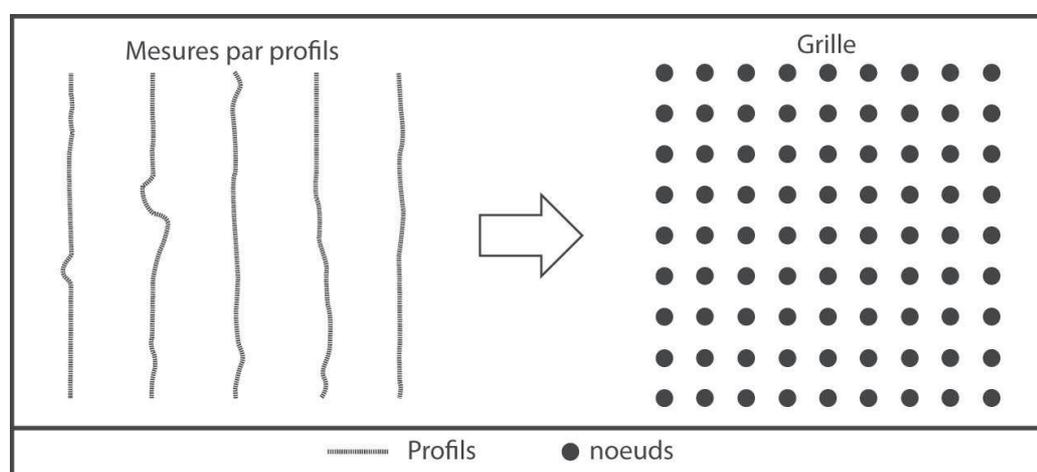


Figure 4.6 – Illustration du passage de mesures par profils quasi-continus et séparés par un espacement donné à une grille dont la répartition des nœuds est uniforme.

4.1.2.5 Représentation de la grille

Une fois calculée, la grille d'anomalie peut être représentée en attribuant aux valeurs des couleurs selon une des deux échelles suivantes, en fonction de ce que l'on souhaite observer (Figure 4.7) :

- **Échelle linéaire** : les valeurs sont réparties sur une barre de couleur qui varie linéairement entre des valeurs minimale et maximale qui sont modulables. Le défaut de ce type de représentation intervient lorsque l'intervalle d'intensité des anomalies est grand. Les anomalies les plus

5. Explication de l'auteur en annexe C, page 181.

faibles seront alors masquées par les plus fortes qui agglutinent l'essentiel des couleurs si l'on choisit un intervalle large et les nuances des anomalies les plus fortes sont supprimées si l'on choisit un intervalle court.

- **Échelle d'équipopulation** : les valeurs sont réparties sur une barre de couleur de telle sorte que chaque couleur soit autant représentée sur la carte. Ainsi, la plupart des variations sont visibles. Le désavantage de ce type de représentation est que l'échelle est propre à un jeu de données ; il est donc très difficile de comparer directement deux cartes sans réévaluation d'une échelle commune. De plus, le rapport d'intensité entre les différentes anomalies peut être difficile à apprécier.

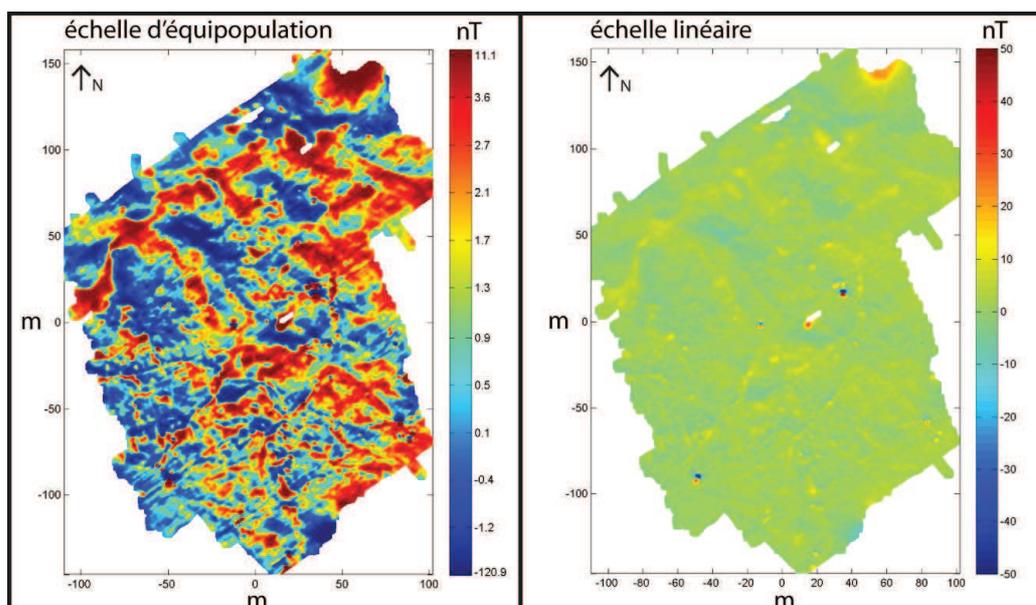


Figure 4.7 – Représentations d'une même grille d'anomalies magnétiques réalisée à l'aide du dispositif à capteurs portés au moyen d'échelles de couleurs d'équipopulation et linéaire.

4.2 Acquisition

L'acquisition des données magnétiques s'est déroulée au cours de trois campagnes de terrain ayant eu lieu aux printemps 2012, 2013 et 2014.

4.2.1 Étalonnage

Lors de l'étalonnage, on doit pouvoir considérer le gradient magnétique comme nul autour du point de référence. Dans le cas de *Qasr 'Allam*, un unique point d'étalonnage a été défini. De cette façon, les différentes cartes porteront toutes les mêmes erreurs d'approximation, facilitant ainsi leur comparaison et l'interprétation. Afin de limiter les variations magnétiques, le point retenu se situe au niveau d'un affleurement bien dégagé du socle de grès, à plusieurs dizaines de mètres de toute construction apparente (Figure 4.8). Ces mesures sont faites en début et fin de session d'acquisition afin d'obtenir les étalonnages les plus précis possibles et de pouvoir les utiliser pour la correction des variations temporelles.



Figure 4.8 – *Étalonnage du dispositif à capteurs traînés (Simon Fleury).*

Le processus permet de corriger les erreurs d'angle, de sensibilité et de décalage de chaque magnétomètres. L'écart-type entre ces derniers passe ainsi de plusieurs centaines à moins de dix nano-Teslas. On peut ainsi générer une

première cartographie du champ où les variations les plus grossières seront visibles, notamment un gradient entre les profils (Figure 4.9). Ce phénomène ainsi qu'une partie du décalage entre les capteurs peut s'expliquer par les variations temporelles du champ.

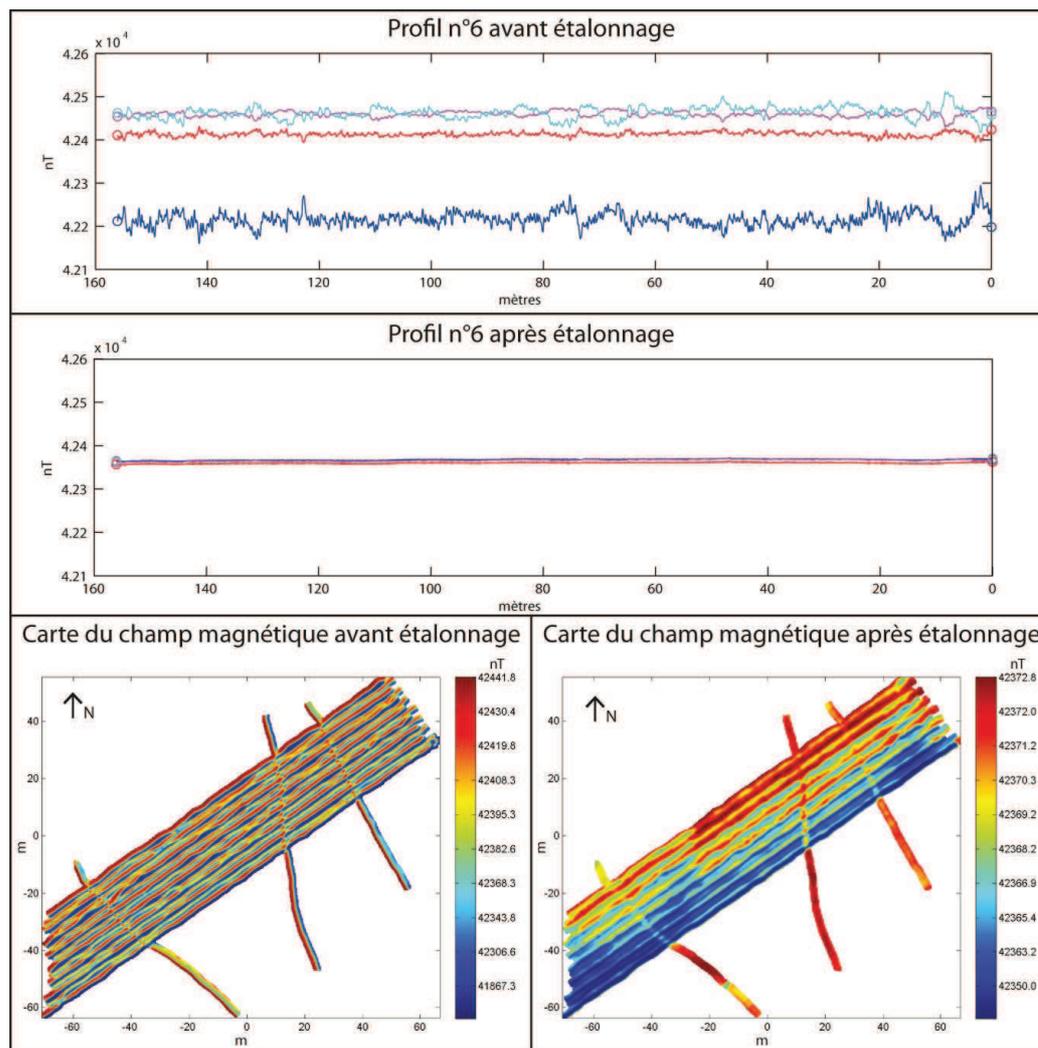


Figure 4.9 – Illustration des effets de l'étalonnage sur la cartographie C10 et son profil d'acquisition 6. L'échelle des cartes est en équipopulation. Pour les profils, chaque couleur correspond à un des quatre magnétomètres.

4.2.2 Correction de la dérive temporelle

Les enregistrements de température n'ayant pas fonctionné à *Qasr 'Allam*, on peut corriger l'effet des variations temporelles à l'aide d'une régression linéaire entre deux étalonnages ou deux mesures d'un même point fixe. En effet, la mesure des variations du champ enregistrée par un capteur fixe permet d'observer une dérive approximativement linéaire à l'échelle de la session de mesure (Figure 4.10). À noter que cette correction est propre à chaque capteur, du fait que la dérive thermique est différente pour chaque magnéto-mètre. Ainsi on obtient une première carte des variations spatiales du champ magnétique. On peut alors observer un effet de nivellement et de festonnage entre les profils (Figure 4.11).

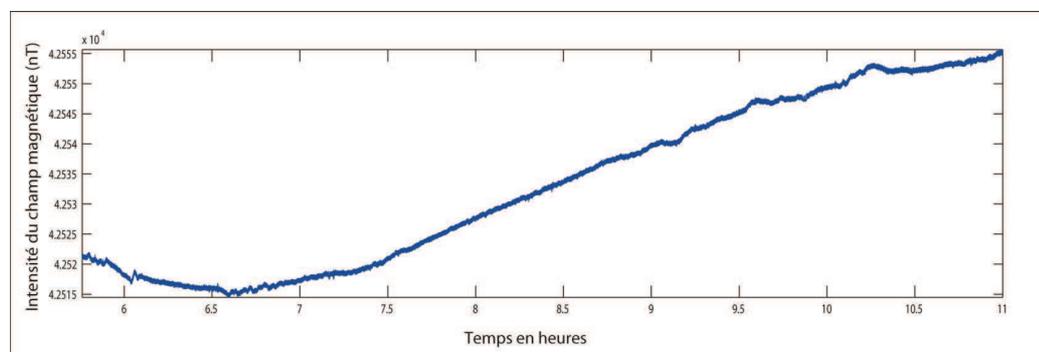


Figure 4.10 – Intensité du champ magnétique mesurée en 2013 par un magnéto-mètre à vanne de flux immobile sur le site de *Qasr 'Allam* aux heures habituelles de prospection.

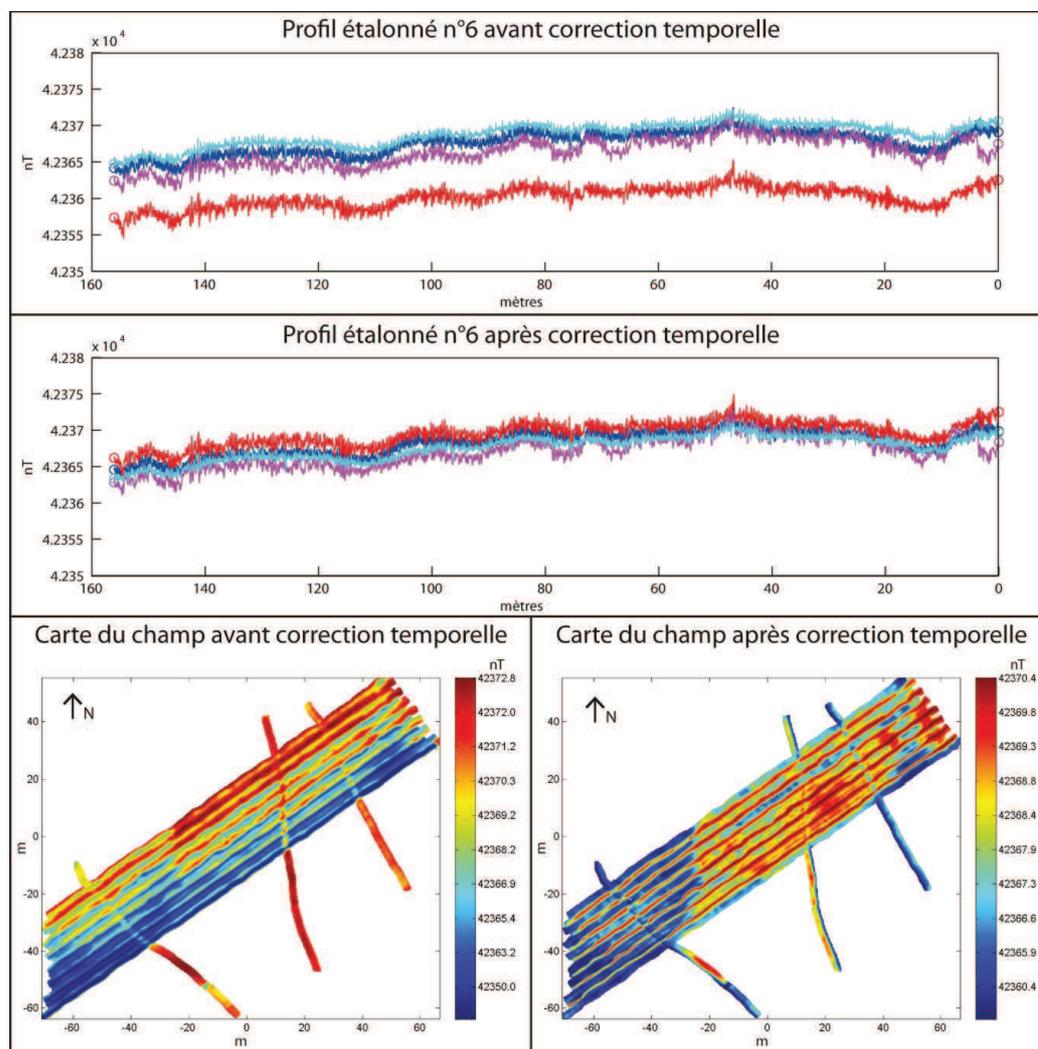


Figure 4.11 – *Illustration des effets de la correction temporelle sur la cartographie C10 et son profil d'acquisition 6. L'échelle des cartes est en équipopulation. Pour les profils, chaque couleur correspond à un des quatre magnétomètres.*

4.2.3 Calcul de l'anomalie

La méthode de calcul de l'anomalie dépend du dispositif utilisé pour les raisons expliquées précédemment : points de croisements pour les cartographies à l'aide de capteurs portés ou traînés, médiane sur profil pour l'acquisition sur parois. On peut ainsi calculer des profils et cartes où des variations spatiales de l'ordre du nano-Tesla peuvent être identifiées (Figure 4.12). On remarque

néanmoins toujours des traces le long des profils. S'il est en général aisé de faire abstraction de ces légères perturbations sur les cartographies à capteurs portés, cela est beaucoup plus difficile sur les cartographies à capteurs traînés ou pour les parois, par nature plus fines ; elles peuvent être, dans tous les cas, une source d'erreurs d'interprétation. Ce phénomène peut s'expliquer par des imprécisions de positionnement qui ont pour effet de décaler spatialement les profils par rapport à leur place dans le référentiel sélectionné.

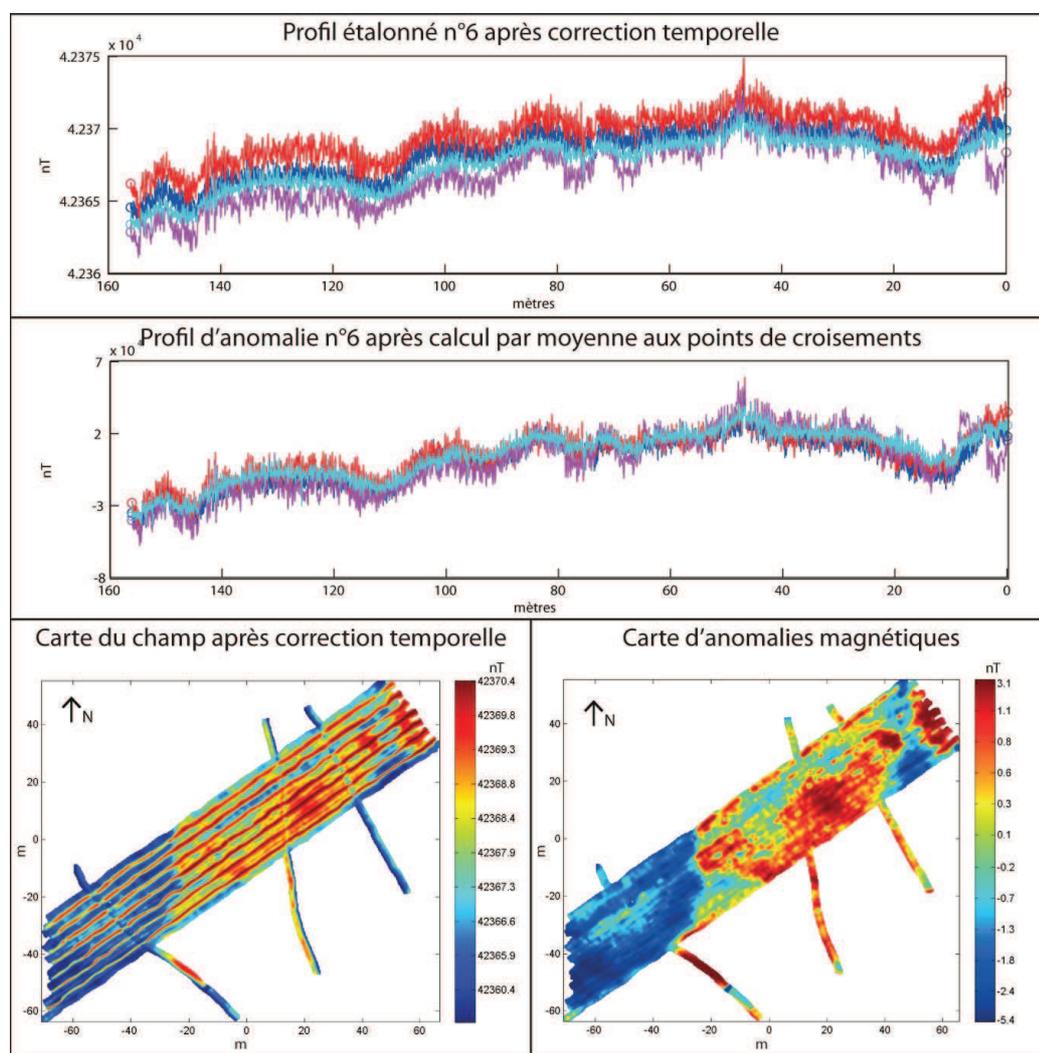


Figure 4.12 – Illustration des effets du calcul de l'anomalie sur la cartographie C10 et son profil d'acquisition 6. L'échelle des cartes est en équipopulation. Pour les profils, chaque couleur correspond à un des quatre magnétomètres.

4.2.4 Positionnement

Lors de l'acquisition des données magnétiques hors parois, le positionnement est réalisé à l'aide d'une antenne *GPS*. La précision de ce genre de mesure dépend de nombreux facteurs comme les perturbations atmosphériques ou encore le nombre et les positions relatives des satellites disponibles. Concrètement, ces imprécisions peuvent se traduire de deux manières différentes sur le signal *GPS* reçu : soit à travers une dérive progressive, soit à travers des sauts brusques. On retrouve ces deux comportements, sources de décalage spatiaux des données magnétiques, lors des campagnes d'acquisition dans l'oasis de *Bahariya* (Figure 4.13). On remarque facilement qu'une dérive rapide et de multiples sauts ont lieu tous les jours à partir de la fin de la matinée (entre dix heures et midi). Afin de minimiser les erreurs, les sessions d'acquisitions sont donc réalisées préférentiellement entre cinq et dix heures. Lors du traitement des données, les sauts ponctuels sont éliminés et une interpolation linéaire est réalisée entre le point précédent et le suivant. La dérive restante peut être en partie corrigée à l'aide d'une égalisation sur grille.

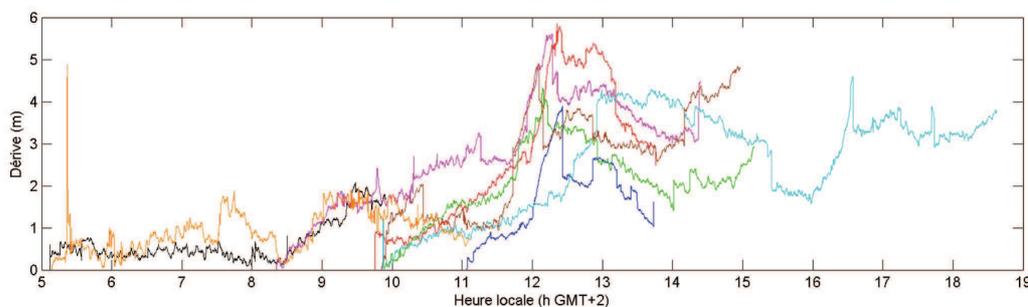


Figure 4.13 – Dérive du GPS au-dessus du même point fixe en fonction de l'heure locale au cours de huit jours d'acquisition consécutifs. Chaque couleur correspond à un jour différent. La dérive correspond à la distance à la première mesure de chaque session d'acquisition

4.2.5 Égalisation sur grille

Pour réaliser l'égalisation, on va calculer une grille d'anomalies en atténuant suffisamment les fréquences les plus hautes à l'aide de *gridfit* jusqu'à

ce que les effets de nivellement ne soient plus visibles. On cherche ensuite à minimiser la différence entre les profils et la grille atténuée. Pour cela, on utilise la méthode des moindres carrés en considérant une erreur de décalage et de pente pour chaque profil. La conséquence directe est l'atténuation des traces de nivellement et de festonnage (figure 4.14). À l'aide de tout ce processus, on peut donc obtenir des cartes d'anomalies magnétiques où toutes les sources de perturbations ont été minimisées, améliorant ainsi la précision des observations et réduisant les risques de mauvaise interprétation.

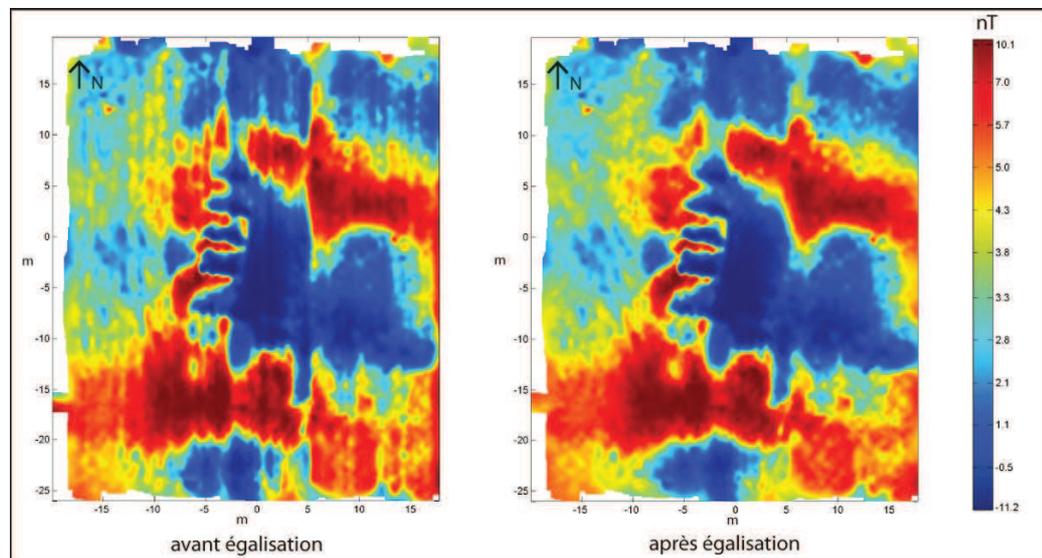


Figure 4.14 – Illustration des effets de l'égalisation sur grille de la cartographie L1. Échelle de couleur d'équipopulation.

4.3 Résultats

4.3.1 Cartes d'anomalies

4.3.1.1 Dispositif à capteurs portés

La mesure à l'aide du dispositif à capteurs portés a pris place lors de la campagne 2012 entre le 11 avril et le 13 mai. En 25 jours d'acquisitions, un peu plus de 800 km de profils magnétiques, correspondant à 200 km pour l'opérateur, ont été mesurés. Ainsi, une zone d'environ 340 000 m²

a été couverte à l'ouest et au sud de la plate-forme (Figure 4.15). La carte d'anomalie obtenue à partir de ces données permet d'identifier plusieurs types d'anomalie (Figure 4.16).

- **Gradient nord-sud** : le champ d'anomalie décroît du nord au sud d'environ 20 nT.
- **Linéations de large longueur d'onde** : ces linéations, de l'ordre de la dizaine de mètres, dessinent deux rectangles d'approximativement 150 x 100 et 125 x 100 m au centre de la carte. Leur orientation est de quelques degrés vers l'est.
- **Linéations de courte longueur d'onde** : ces linéations, de l'ordre du mètre et inférieures, sont les anomalies les plus nombreuses. On peut noter différents groupes en fonction de leur forme et orientation. Au sud, on note une forte concentration de linéations curvilignes alignées grossièrement selon les axes est-ouest et nord-sud. On peut remarquer la même disposition au nord dans une plus faible quantité. Au centre, les linéations sont plus rectilignes et suivent la même orientation que les linéations plus larges qui les entourent.
- **Anomalies ponctuelles** : l'anomalie ponctuelle de plus forte intensité se trouve à l'ouest. Elle correspond à un pylône métallique. Les autres ne montrent aucune distribution particulière.

Les anomalies qui présentent le plus fort intérêt archéologique sont les différents types de linéations. En effet, les anomalies curvilignes de courte longueur d'onde suivent les mêmes orientations générales que les vestiges hydrauliques visibles en surface, ce qui peut suggérer une nature similaire. Dans la partie centrale, les formes plus rectilignes, l'orientation similaire à celle de la plate-forme ainsi que la position en face de la rampe d'accès de cette dernière suggèrent la présence de bâtiments. Afin de mieux comprendre cette zone où différents types d'anomalie sont présents, une cartographie plus fine a été conduite.

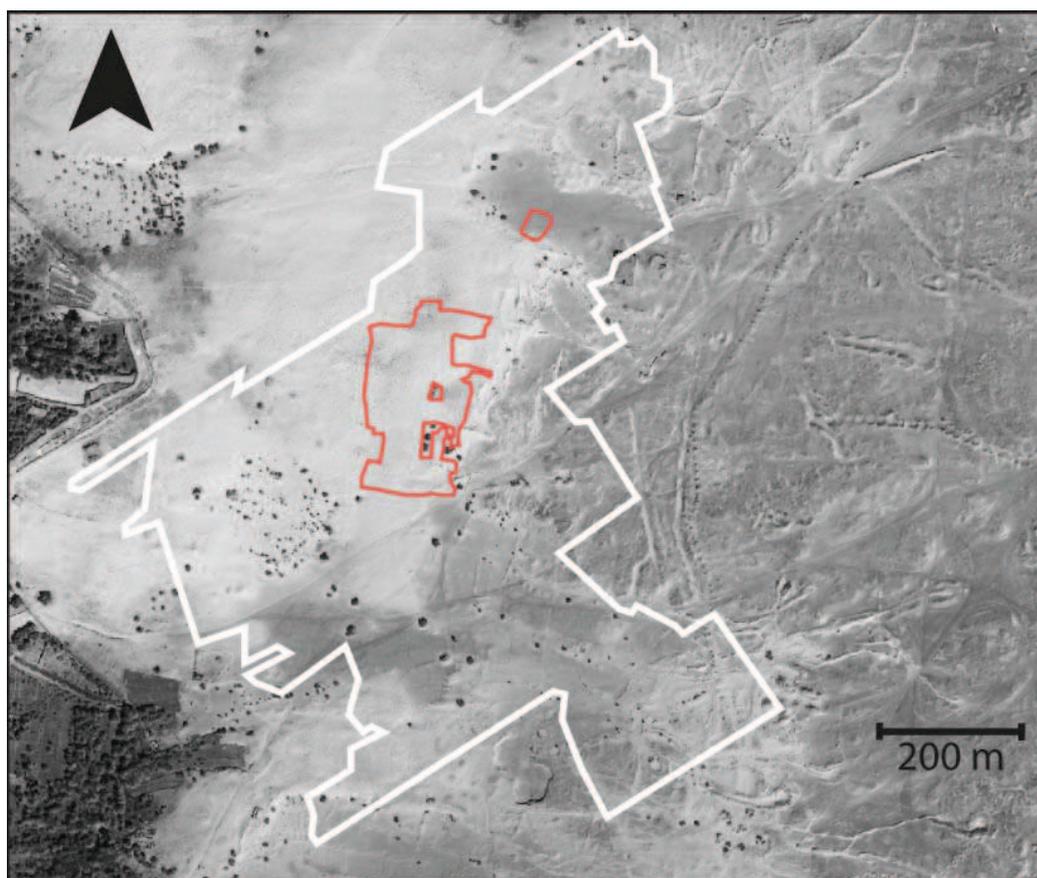


Figure 4.15 – Surfaces couvertes à l'aide du dispositif à capteurs portés en blanc et à l'aide du dispositif à capteurs traînés en rouge. La plus petite surface correspond à la zone test pour comparaison entre dispositifs et gradiométrie. Photographie satellite de 2003 (références voir Figure 1.4, p. 25).

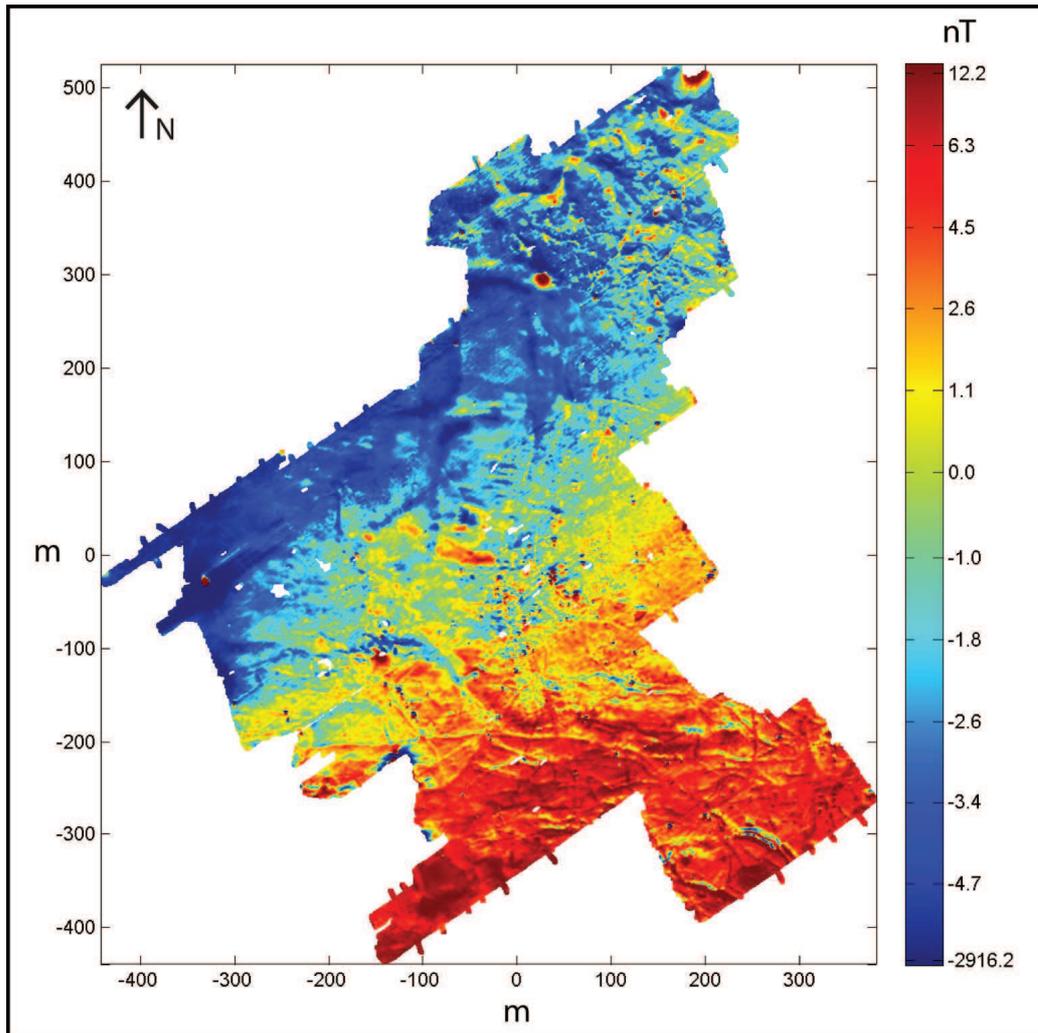


Figure 4.16 – Carte d'anomalie acquise à l'aide du dispositif à capteurs portés. Échelle en équipopulation.

4.3.1.2 Dispositif à capteurs traînés

La mesure à l'aide du dispositif à capteurs traînés a été réalisée entre le 1^{er} et le 6 avril 2013 ainsi qu'entre le 13 avril et le 15 mai 2014. En 27 jours d'acquisition, un peu plus de 280 km de profils magnétiques, correspondant à 70 km pour les deux opérateurs, ont été mesurés. Ainsi, une zone d'environ 24 000 m² a été couverte sur la dune de sable, là où de potentielles constructions ont pu être identifiées à l'aide du premier dispositif. La carte d'anomalie ainsi obtenue permet de faire plusieurs observations (Figure 4.16).

- Dans la moitié sud, on peut observer une forme rectangulaire d'environ 30 x 30 m. On peut voir à l'ouest de sa partie intérieure plusieurs linéations de longueur d'onde très courte.
- Dans la partie centrale de nombreuses linéations semblent former un quadrillage grossier. Leur longueur d'onde est plus courte à l'est qu'à l'ouest.
- Aux extrémités sud, ouest et nord, les linéations sont beaucoup plus étalées et semblent entourer la plupart des autres linéations.

Toutes ces observations suivent la même orientation générale et peuvent potentiellement correspondre à du bâti. Les différences de longueur d'onde et de forme peuvent s'expliquer par de nombreux facteurs : la taille, la composition, la nature de l'encaissant, l'épaisseur de la couverture sédimentaire ou plusieurs niveaux d'occupation.

4.3.2 Comparatif

Au cours des mesures des différentes campagnes d'acquisition, une zone a été sélectionnée pour réaliser un test comparatif entre les dispositifs de l'étude et un gradiomètre utilisé couramment pour l'étude archéologique. En effet, environ 29 000 m² ont été cartographiés à l'aide d'un gradiomètre vectoriel (*Geoscan FM 256*) par Tomasz Herbich au cours de deux campagnes d'acquisition en 2006 et 2010⁶. Il est alors possible de comparer champ d'anomalie de l'intensité et gradient vertical des différents jeux de données en utilisant

6. Colin (2006, 2010).

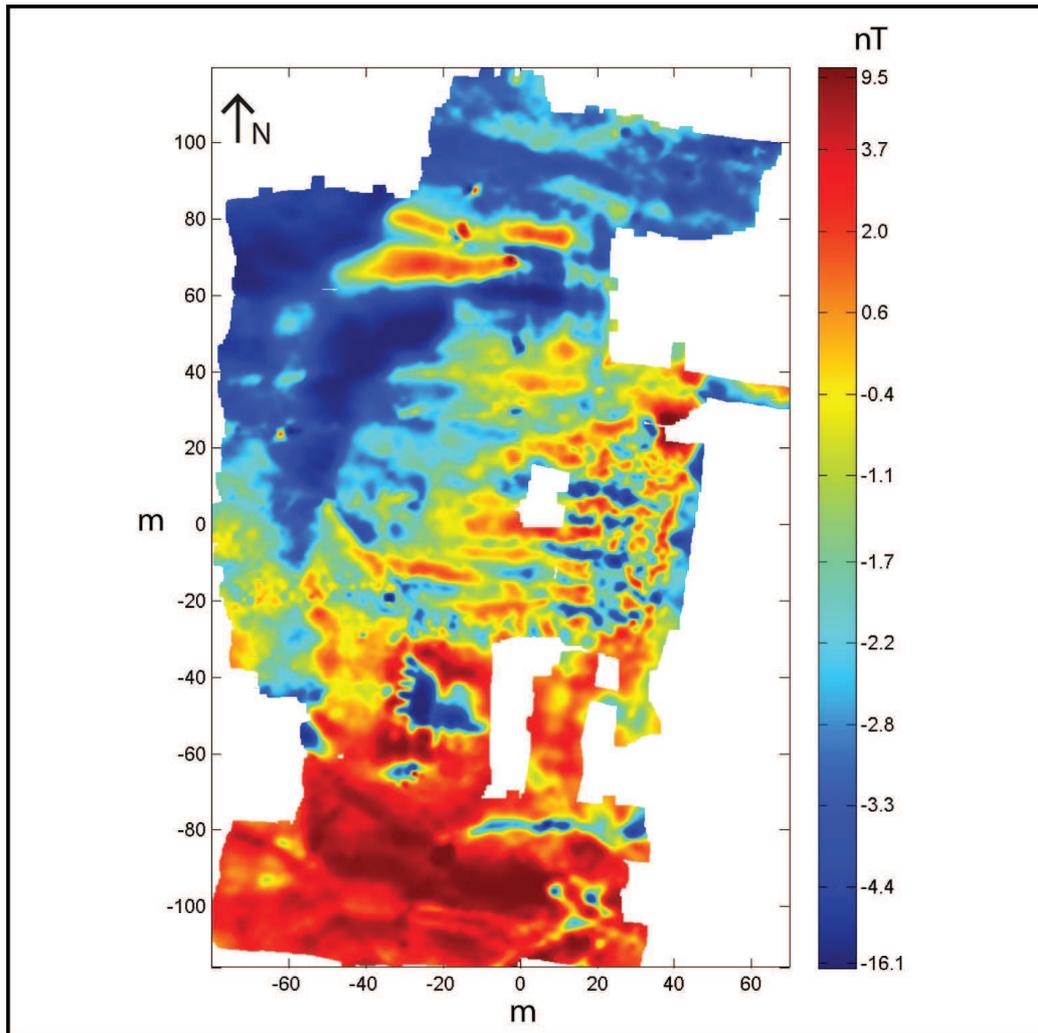


Figure 4.17 – Carte d'anomalie acquise à l'aide du dispositif à capteurs traînés. Échelle en équipopulation.

l'opérateur de dérivation (et d'intégration) directionnelle. L'effet de l'application de la réduction au pôle est également calculé (Figure 4.18). On peut ainsi faire plusieurs observations :

- les cartes d'anomalie du champ obtenues par la mesure du champ total sont plus détaillées que celle calculée à partir de la mesure de gradiométrie ; il en est de même pour les cartes réduites au pôle ;
- les cartes du gradient vertical du dispositif à capteurs portés et du gradiomètre sont assez similaires ;
- les cartes issues de la mesure du dispositif à capteurs traînés sont dans tous les cas plus détaillées et révèlent plus d'informations.

Ces résultats permettent de valider dans la pratique certaines performances théoriques : l'acquisition du champ total à 1 m du sol permet bien d'obtenir au moins autant d'informations que la gradiométrie en configuration classique⁷ ; et la mesure centimétrique au plus près des sources permet effectivement d'obtenir des détails plus fins sur ces dernières. Ces dernières présentent néanmoins de légers effets de festonnage et de nivellement qui proviennent très probablement des imprécisions du positionnement *GPS*.

On peut également noter une différence de vitesse et de praticabilité. En effet, le processus d'acquisition au gradiomètre nécessite la mise en place d'un carroyage au sol ; la couverture de la dune a donc été considérée comme laborieuse du fait du relief accidenté et de la végétation. Cette même zone a pu être cartographiée sans contrainte particulière par un opérateur seul à l'aide du dispositif à capteurs portés. De plus, ce dernier permet de couvrir en trois à six heures une surface similaire à celle obtenue à l'aide du gradiomètre en deux campagnes d'acquisition. L'acquisition à l'aide du dispositif à capteurs traînés a, quant à elle, nécessité le retrait de certains éléments de végétation desséchée obstruant le passage. Les surfaces cartographiées à l'aide de ce dernier et du gradiomètre sont du même ordre de grandeur.

Le système de mesure mis en place dans l'étude permet donc, au choix, de couvrir des grandes surfaces plus rapidement et facilement que les gra-

7. Pour une comparaison à une échelle plus large, voir Gavazzi *et al.* en annexe D, page 189.

diomètres tout en révélant au moins autant d'informations sur le sous-sol, ou d'obtenir des données plus précises et détaillées en gardant une vitesse d'acquisition similaire.

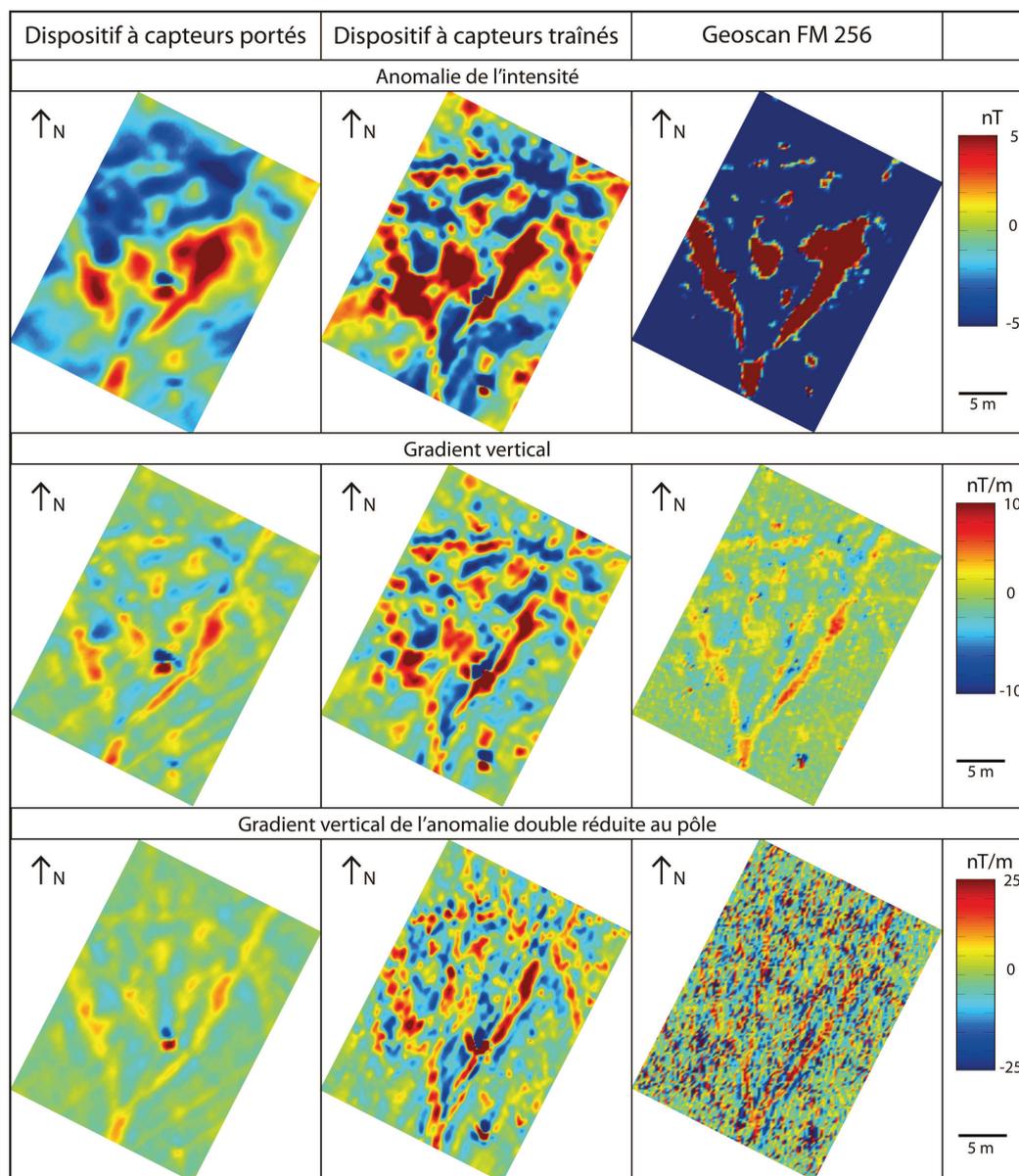


Figure 4.18 – Comparaison entre les cartes de l'anomalie de l'intensité magnétique, de son gradient vertical et de son gradient vertical après double réduction au pôle obtenues à l'aide des dispositifs de l'étude et d'un gradiomètre vectoriel (modèle Geoscan FM 256).

Chapitre 5

Les sources d'anomalie

Sommaire

5.1	Étude multi-échelle	127
5.1.1	Dispositif à capteurs portés	127
5.1.1.1	Anomalies ponctuelles	127
5.1.1.2	Gradient Nord - Sud	129
5.1.1.3	Linéations	130
5.1.2	Dispositif à capteurs traînés	134
5.2	Études détaillées	137
5.2.1	Zone 1	137
5.2.2	Zone 2	140
5.2.3	Zone 3	148
5.3	Mesures sur échantillons	152
5.4	Interprétation générale du site	154

Chapitre 5 : Les sources d'anomalie

Le but de ce chapitre est de présenter les interprétations des sources des anomalies de l'intensité du champ magnétique. Une première analyse spatiale multi-échelle à l'aide des opérateurs de transformation est donnée (section 5.1). Cette dernière permet d'identifier des zones où des études détaillées sont conduites (section 5.2). Différents niveaux stratigraphiques sont ensuite étudiés à travers des mesures sur échantillons (section 5.3) avant une interprétation générale du site (section 5.4).

5.1 Étude multi-échelle

Le but de l'étude multi-échelle est d'obtenir des informations sur les sources des différents types d'anomalies identifiés dans le chapitre précédent à l'aide des opérateurs de transformation décrits dans le chapitre 3.

5.1.1 Dispositif à capteurs portés

5.1.1.1 Anomalies ponctuelles

Les anomalies ponctuelles peuvent facilement être pointées, et leur profondeur estimée par inversion à partir du signal analytique 3D¹ (Figure 5.1). Des éléments métalliques présents en surface ont également été caractérisés afin de confirmer la validité de l'inversion (Figure 5.1, point 13 et Figure 5.2). La profondeur alors obtenue est nulle, ce qui est cohérent. Pour les autres sources, on peut s'apercevoir que la profondeur est faible. En effet, en dehors de la dune elle n'excède pas 0.5 m tandis qu'au sein de cette dernière elle n'atteint pas plus de 1.5 m. Ce faible enfouissement et la répartition qui semble désorganisée permettent d'interpréter les sources de ces anomalies comme une pollution par des éléments compacts présentant une aimantation forte, similaire aux déchets métalliques que l'on peut trouver en surface au point 13 (Figure 5.2). Le site sert en effet de dépotoir à certains habitants de l'oasis.

1. Chapitre 3, section 3.5.4.3, page 89.

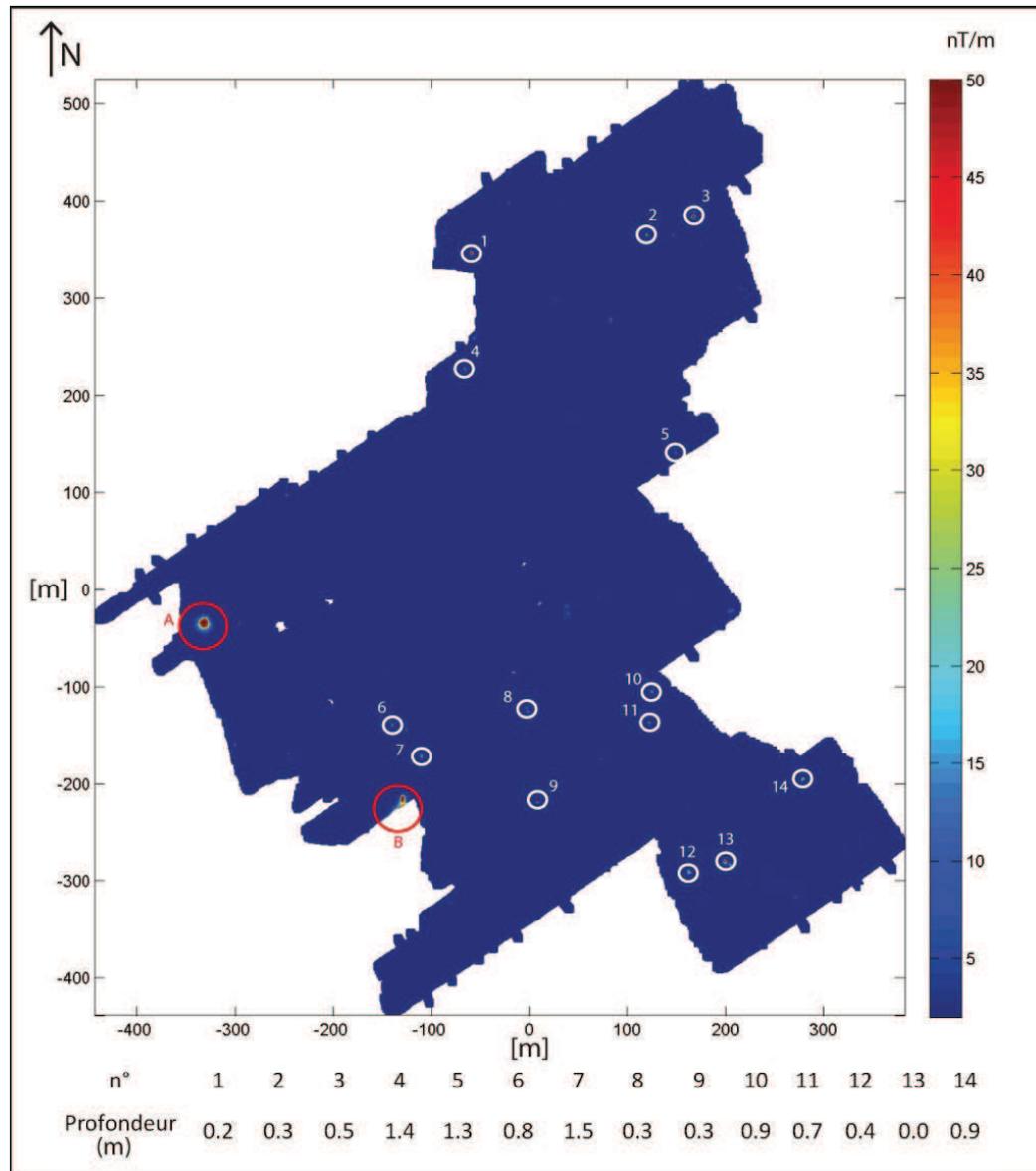


Figure 5.1 – Carte du signal analytique où sont pointées les anomalies ponctuelles de plus forte amplitude. La profondeur obtenue par inversion est donnée pour chaque point. A et B correspondent aux perturbations dues à des sources au dessus de la surface, respectivement un pylône électrique et un poulailler. Le point 13 correspond au dépotoir de la Figure 5.2.

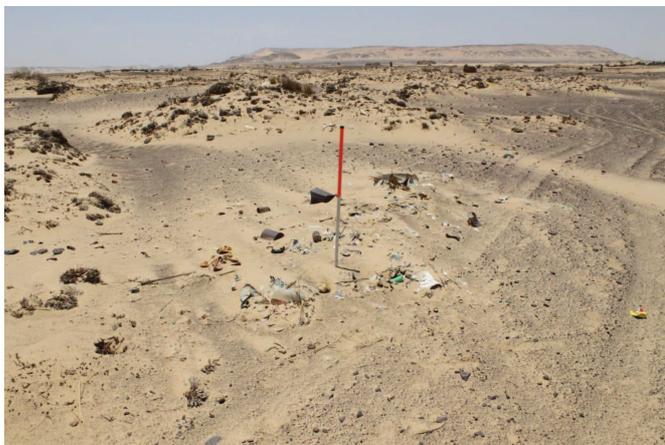


Figure 5.2 – Photographie prise en 2012 du dépotoir correspondant au point 13 de la figure 5.1, p. 128 (Bruno Gavazzi).

5.1.1.2 Gradient Nord - Sud

Le gradient nord-sud est facilement observable indépendamment des autres anomalies à l'aide d'un prolongement vers le haut de 100 m (Figure 5.3, A). On peut alors noter une variation d'environ 7 nT du nord vers le sud. Cette dernière ne peut pas s'expliquer par l'*IGRF*, celui-ci variant d'environ 6 nT du sud vers le nord à la même altitude (Figure 5.3, B). La source du gradient peut donc être interprétée comme une variation locale et profonde de la géologie ne présentant pas d'intérêt direct à l'étude archéologique.

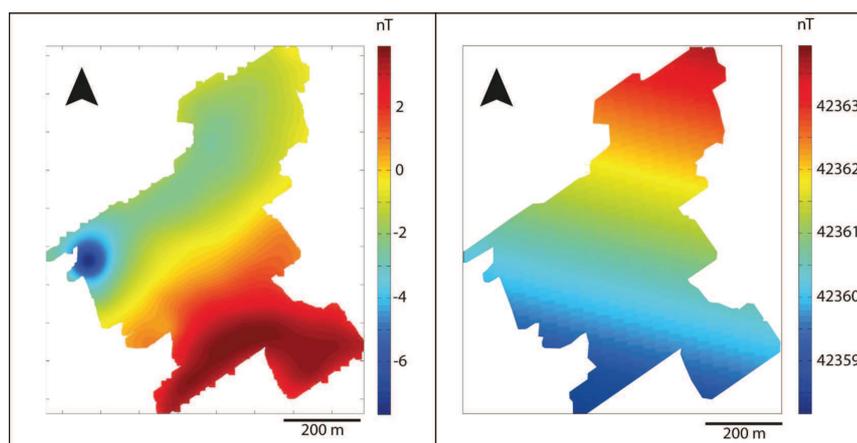


Figure 5.3 – A - Carte de l'anomalie de l'intensité prolongée de 100 m vers le haut. B - Carte de l'*IGRF* de la zone à 100 m d'élévation (230 m d'altitude).

5.1.1.3 Linéations

Dans le chapitre précédent, les linéations ont pu être attribuées à deux types de vestiges archéologiques potentiels : des bâtiments et des ouvrages hydrauliques. Les sources d'anomalie peuvent alors correspondre à un comblement naturel ou anthropique de vides (négatifs de murs, chenaux, etc.) ou de structures toujours au moins partiellement en place. Dans tous les cas, les fouilles déjà réalisées ont révélé des matériaux de construction (briques crues) et de comblement (sable et argile) ne présentant qu'une faible concentration de matériaux ferromagnétiques au sens large. Il est alors possible de considérer que les sources à l'origine des linéations possèdent une aimantation rémanente négligeable face à leur aimantation induite. Cette affirmation peut être vérifiée en observant en détail une double réduction au pôle des mesures en considérant l'aimantation comme seulement induite (Figure 5.4).

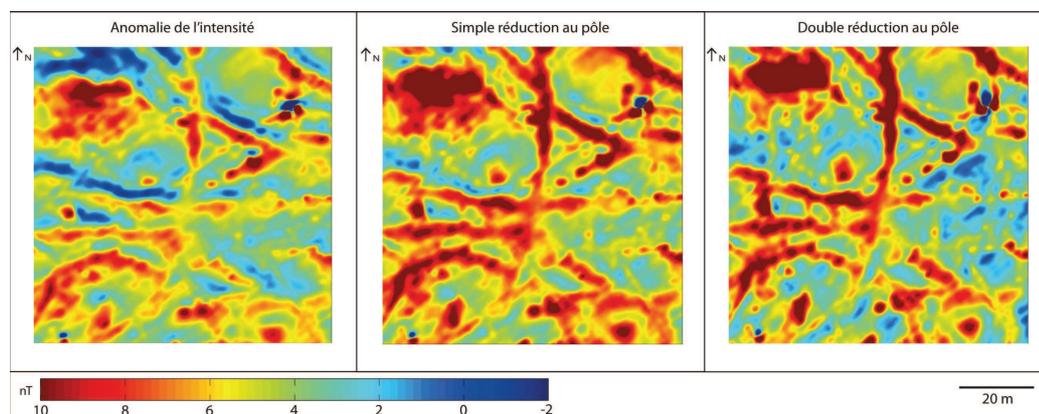


Figure 5.4 – Carte de l'anomalie de l'intensité du champ magnétique, de sa simple et de sa double réduction au pôle en considérant une aimantation seulement induite pour une zone de mesure à l'aide du dispositif à capteurs portés.

On remarque alors que comme pour le cas synthétique², les anomalies du champ total ainsi que les anomalies réduites au pôle sont asymétriques, tandis que les linéations deviennent bien symétriques une fois la double réduction

2. Section 3.5.3, page 83.

appliquée, ce qui ne devrait pas être le cas en présence d'aimantations rémanentes. On peut donc localiser la position horizontale des sources et mieux déterminer leur forme à l'aide d'une double réduction au pôle (Figure 5.5). Il est ensuite possible de mettre en valeur les différentes linéations par rapport aux anomalies d'origine géologique, présentant les longueurs d'onde les plus grandes, à l'aide d'une dérivée verticale (Figure 5.6).

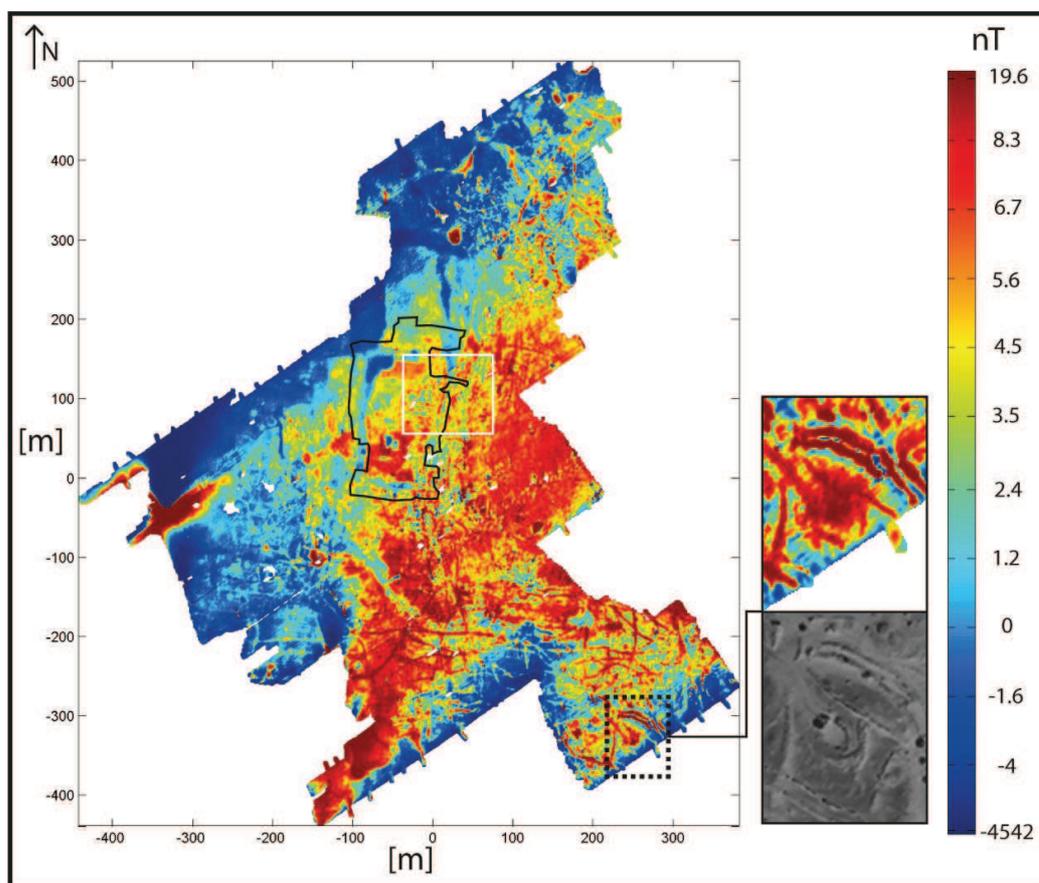


Figure 5.5 – Carte de l'anomalie de l'intensité après double réduction au pôle. Les limites de la zone cartographiée à l'aide du dispositif à capteurs traînés et de la zone 1 pour l'étude détaillée sont tracées respectivement en noir et en blanc. L'agrandissement et l'image satellite associée (références voir Figure 1.4, p. 25) correspondent à la zone délimitée par le trait pointillé.

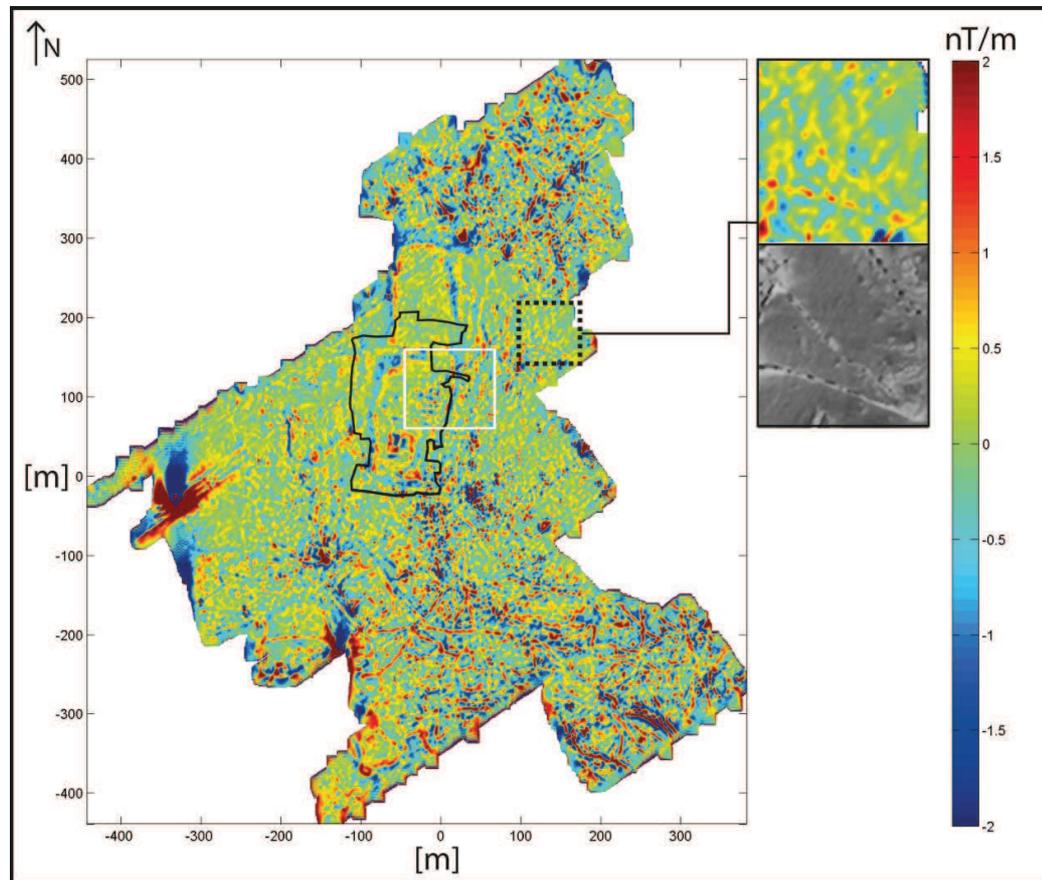


Figure 5.6 – Dérivée verticale de l'anomalie de l'intensité après double réduction au pôle. Les limites de la zone cartographiée à l'aide du dispositif à capteurs traînés et de la zone 1 pour l'étude détaillée sont tracées respectivement en noir et en blanc. L'agrandissement et l'image satellite associée (références voir Figure 1.4, p. 25) correspondent à la zone délimitée par le trait pointillé.

On peut alors s'apercevoir que les sources des linéations curvilignes suivent bel et bien la même orientation que les indices des structures d'irrigation visibles en surface, certaines étant même concomitantes ou dans leur prolongement (Figures 5.5 et 5.6). On peut alors interpréter toutes ces sources comme les témoins de structures hydrauliques invisibles en surface, non seulement sur la surface couverte par la dune de sable, mais également sur tout le site. Les sources à l'origine des autres linéations se révèlent, quant à elles, former des géométries plus organisées présentant de nombreux angles droits, ce qui permet de les interpréter plutôt comme des traces de bâti. Ces résultats per-

mettent une première analyse spatiale du site (Figure 5.7). On peut en effet remarquer que les différentes structures d'irrigation semblent le plus souvent interconnectées ou superposées, provenir majoritairement d'une zone à forte concentration de puits au sud-est, et s'orienter selon deux directions générales : vers l'ouest et le nord. Les structures interprétées comme des traces de bâti suivent quant à elles un alignement similaire à celui de la plate-forme et se retrouvent en face de la rampe d'accès de cette dernière, ce qui suggère que ces éléments pourraient être liés, tout comme certains ensembles de la vallée du Nil (Figure 5.8).



Figure 5.7 – Carte interprétative des sources des différentes linéations sur une image satellite de 2003 (références voir Figure 1.4, p. 25). Les structures hydrauliques sont représentées en blanc, le bâti en noir.

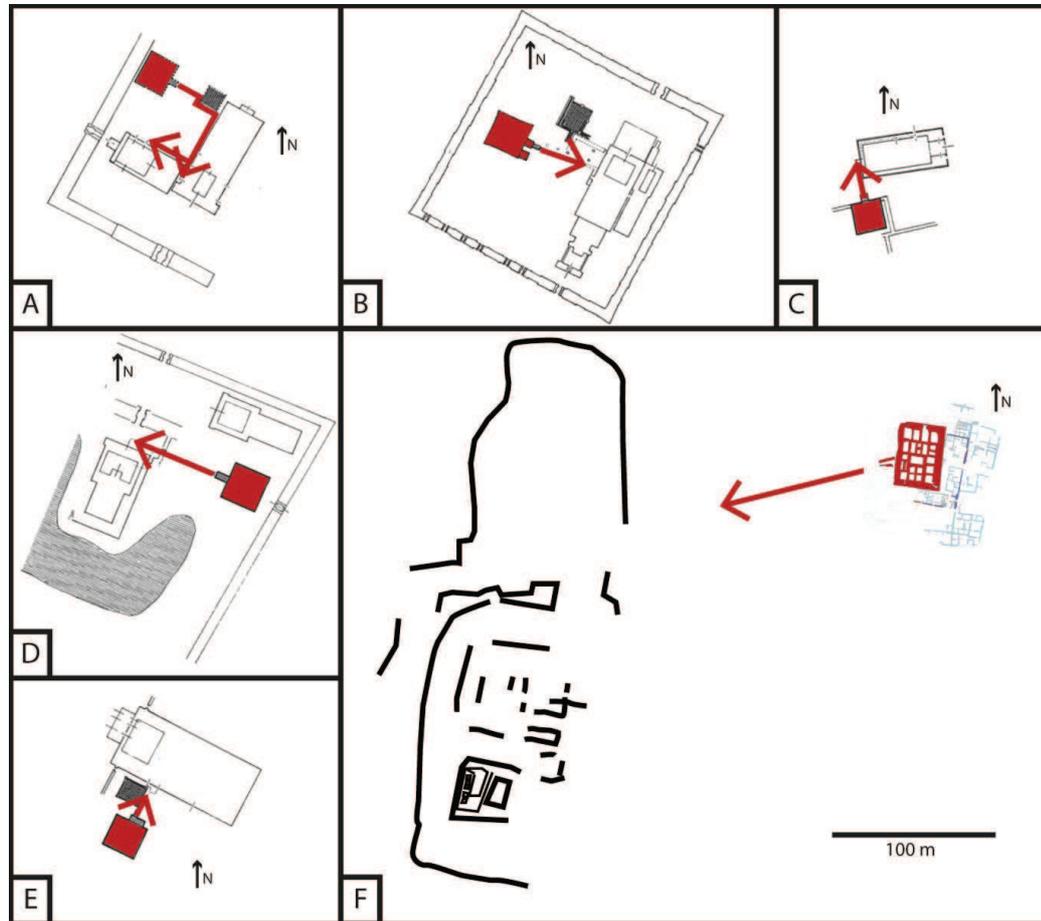


Figure 5.8 – Comparaison à la même échelle entre des plans de sites de la vallée du Nil présentant des plate-formes à caissons (Traunecker 1987, Figure 2, p. 160) et celui de Qasr 'Allam comprenant zone fouillée (plan de Catherine Duvette) et les linéations interprétées comme du bâti. Les plate-formes sont représentées en rouge et les flèches correspondent à la direction dans laquelle pointe leur rampe d'accès. A,B,D - Karnak, C - Hibis, E - Medamoud, F - Qasr 'Allam.

5.1.2 Dispositif à capteurs traînés

Dans le chapitre précédent, plusieurs groupes de linéations pouvant correspondre à du bâti ont pu être observés. De la même manière que pour les linéations obtenues à l'aide du dispositif à capteurs portés, on peut considérer que les sources possèdent une aimantation rémanente négligeable face à

leur aimantation induite³. On peut alors localiser leur position horizontale à l'aide d'une double réduction au pôle et mettre en valeur les différentes longueurs d'onde à l'aide de la dérivée verticale (Figure 5.9). On peut ainsi faire plusieurs observations et classer les sources en différentes catégories.

- **Catégorie 1** : on note la présence de formes grossières de différentes tailles, formant des lignes et des angles droits, sur toute la partie centrale. La dérivée verticale révèle des linéations dont la plupart ont une orientation similaire à celle de la plate-forme.
- **Catégorie 2** : des linéations de longueur d'onde plus courtes sont visibles à l'est des cartes. La majorité de ces anomalies présente également le même alignement que celui de la plate-forme et certaines prolongent les linéations de la catégorie 1.
- **Catégorie 3** : la forme rectangulaire d'environ 30 x 30 m présente les amplitudes les plus fortes ; elle est subdivisée par des linéations de longueur d'onde plus courtes formant des cellules rectangulaires de quelques mètres de côté. L'alignement est également similaire à celui de la plate-forme.
- **Catégorie 4** : on peut également noter la présence de quelques linéations qui suivent des orientations différentes de celles des autres anomalies décrites ci-dessus et ne présentent aucune organisation particulière. On note également la présence de deux formes circulaires.

La différence de longueur d'onde entre les linéations dans la partie centrale (catégorie 1) et celles à l'est (catégorie 2) peut s'expliquer par un recouvrement sédimentaire différent. En effet, les longueurs d'onde les plus courtes se retrouvent dans une dépression de la dune de sable (Figure 5.9, C-D), où la profondeur d'une même source se retrouve logiquement réduite par rapport aux zones plus élevées de la dune. Ainsi, les linéations des catégories 1 et 2 qui se prolongent correspondent aux mêmes structures.

3. La symétrie obtenue à l'aide d'une double réduction au pôle en faisant la considération d'une aimantation seulement induite peut être observée en détail plus loin dans le chapitre (Figure 5.12, A, page 142).

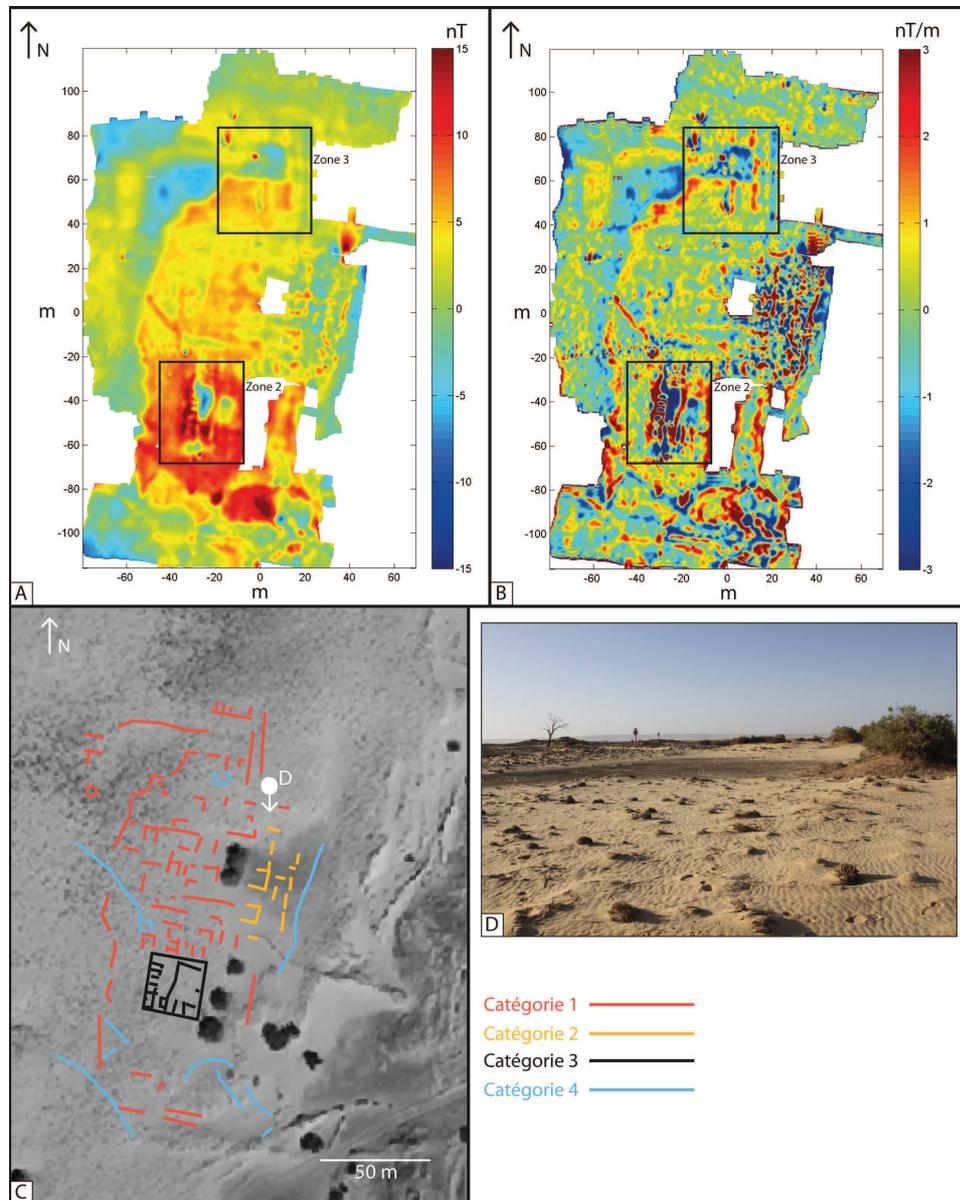


Figure 5.9 – A - Carte de l'anomalie de l'intensité après double réduction au pôle. Les zones 2 et 3 correspondent aux zones pour l'étude détaillée. B - Dérivée verticale de l'anomalie de l'intensité après double réduction au pôle. Les zones 2 et 3 correspondent aux zones pour l'étude détaillée. C - Carte interprétative montrant les 4 catégories de sources identifiées sur une photographie satellite de la zone (références voir Figure 1.4, p. 25). La position de la photographie D est indiquée par une flèche. D - Photographie de la dépression à l'intérieur de la dune de sable (Frédéric Colin).

Les plus fortes amplitudes et plus courtes longueurs d'ondes de la zone rectangulaire décrite précédemment (catégorie 3), qui se trouve sur une élévation de la dune, indiquent quant à elles une profondeur d'enfouissement certainement plus faible, pouvant être due à plusieurs facteurs : différence de topographie sous-jacente, différence de préservation ou de taille des sources, ou encore différents niveaux d'occupations.

Par analogie avec les interprétations des cartes obtenues à l'aide du dispositif à capteurs portés, les linéations qui ne suivent pas l'orientation de la plate-forme (catégorie 4) peuvent être interprétées comme des structures hydrauliques, contemporaines ou non du bâti.

5.2 Études détaillées

À la suite de l'étude multi-échelle, trois zones ont été sélectionnées pour conduire des études détaillées des sources des différents types d'anomalies. La zone 1 vise l'analyse d'une structure hydraulique, la zone 2 celle de la structure de 30 x 30 m interprétée comme du bâti faiblement enfoui et la zone 3 celle d'une structure à l'origine d'une anomalie de longueur d'onde plus large interprétée comme du bâti plus profondément enfoui dans ou sous la dune de sable.

5.2.1 Zone 1

La zone 1 (Figures 5.5 et 5.6) est centrée sur une structure interprétée comme hydraulique (catégorie 4), invisible en surface, et facilement identifiable à l'aide de la carte de la dérivée verticale de l'anomalie double réduite au pôle (Figure 5.10, A-B). En considérant le rapport de longueur sur la largeur de la linéation observée suffisamment grand, il est possible de définir un profil transversal permettant de considérer la source comme source à deux dimensions (Figure 5.10, B). Le signal analytique du profil ainsi obtenu permet d'identifier la position horizontale de la source, qui correspond à un maximum local. Cette dernière est bien similaire à celle donnée par le maximum local de la carte de la dérivée verticale de l'anomalie double réduite au

pôle (Figure 5.10, B-C). La considération de l'aimantation majoritairement induite appliquée pour la réduction semble donc cohérente. La profondeur en fonction du facteur de forme n est finalement calculable par inversion (Figure 5.10, C). Le résultat varie entre 0.7 m pour une source prismatique et 1.6 m pour une ligne de section ponctuelle.

Un sondage de vérification dirigé par Frédéric Colin a ensuite été conduit pour atteindre ces sources⁴. Ce dernier a permis de mettre en évidence plusieurs informations.

- Au niveau supposé de la source de l'anomalie pour n entre 1 et 2, c'est à dire entre 0.7 et 1.2 m, des dépôts argileux compacts parcourus par des lits successifs d'un même canal ont été mis au jour (Figure 5.10, D). Le comblement d'un de ces lits présente une concentration importante et homogène de céramiques et de quelques figurines en terre cuite appartenant à la période de construction et d'utilisation originelle de la plate-forme, définie précédemment comme deuxième période d'occupation (Figure 5.10, E). Ces résultats permettent d'établir un *terminus ante quem*⁵ à l'utilisation d'un système d'irrigation dans la zone au 8^e/7^e siècle avant l'ère commune.
- Les lits comblés sont recouverts d'un dépôt majoritairement argileux à forte concentration de matière organique (terre noire) présentant des traces de cristallisation saline ainsi que de nombreux outils lithiques et tessons concassés. Ces indices témoignent d'un enrichissement fertile du sol et de processus d'inondation et d'assèchement liés à une activité agricole. Les formes de la deuxième période d'occupation sont absentes des sédiments et l'observation de quelques pièces semble indiquer l'époque romaine.
- Les dépôts de terre noire sont recouverts par une importante épaisseur de sable éolien présentant des bioturbations. La transition nette entre argile et sable indique un changement environnemental relativement brusque.

4. Colin & Duvette (2012).

5. Date la plus ancienne pouvant être donnée ayant eu lieu après l'événement.

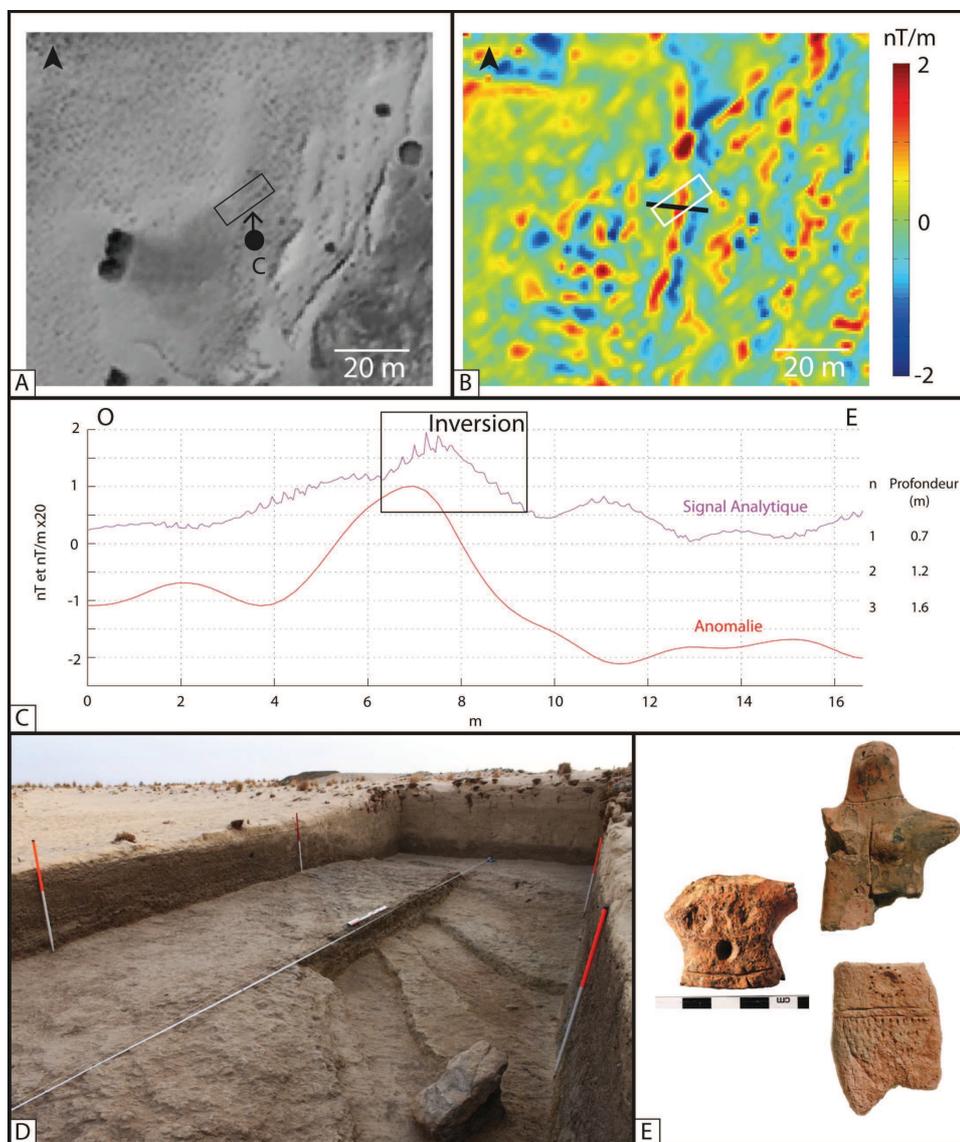


Figure 5.10 – A - Localisation du secteur 15 (rectangle noir) et photographie C sur une image satellite de 2003 (références voir Figure 1.4, p. 25). B - Carte de la dérivée verticale d'ordre 1 de l'anomalie après double réduction au pôle acquise à l'aide du dispositif à capteurs portés. Le profil C est représenté en noir. C - Profil d'anomalie extrait de la grille (rouge), son signal analytique (violet) et les résultats de l'inversion sur la profondeur en fonction du facteur de forme n . D - Photographie du secteur 15 après la fouille (Frédéric Colin). E - Exemple de figurines typiques de la période d'occupation 2 (Lionel Schmitt) trouvées dans le remblai d'un des lits du canal (gauche) et lors de la fouille de la plate-forme (droite).

Afin de mieux comprendre les différentes couches identifiées lors du sondage, une partie de sa berme sud a été cartographiée (Figure 5.11). On peut alors remarquer que l'anomalie créée par le contraste entre sable et terre noire, de l'ordre de quelques nano-teslas, permet à peine d'identifier cette limite, tandis que l'interface entre terre noire et comblement des canaux est à l'origine d'une anomalie de l'ordre d'une trentaine de nano-teslas. Cette différence importante entre deux niveaux composés de matrices argileuses, qui semblent au premier abord similaires, peut s'expliquer soit par une différence originelle de composition, de compaction ou de structure interne, soit par une acquisition au cours de processus postérieurs aux dépôts, comme par exemple une réorganisation verticale des particules aimantées par infiltration ou par battement de la nappe d'eau sous-jacente. Le contraste faible entre le sable et la terre noire peut quant à lui s'expliquer par une mixité des deux couches apportée par les bioturbations.

5.2.2 Zone 2

La zone 2 (Figure 5.9, A-B) est centrée sur les anomalies correspondantes à la catégorie 2 sur la carte acquise à l'aide du dispositif à capteurs traînés et interprétées comme le bâti le moins profondément enfoui sous la dune. Les linéations de différentes longueurs d'onde dessinent un rectangle grossier qui semble subdivisé par des cellules plus petites (Figure 5.12, A). Un profil recoupant perpendiculairement certaines des linéations les plus marquées est extrait de la grille de telle sorte que l'on puisse considérer les sources comme sources à deux dimensions (Figure 5.12, A). On peut alors calculer le signal analytique 2D d'un tel profil, pointer les maxima locaux les plus marqués et calculer la profondeur par inversion en fonction du facteur de forme n (Figure 5.12, B). Plusieurs observations peuvent être ainsi faites. Tout d'abord, les positions horizontales des structures données par les maxima du signal analytique correspondent à celles données par les maxima de l'anomalie double réduite au pôle pour les linéations présentant les longueurs d'onde les plus courtes, ce qui renforce la cohérence de la considération sur l'aimantation majoritairement induite des sources appliquée pour la double réduction. En

revanche, le signal analytique ne permet pas de pointer les anomalies de longueurs d'onde plus grandes. Finalement, l'inversion de profondeur varie du simple au double en fonction de la forme, de quelques dizaines de centimètres pour un effet de largeur et de profondeur de la source à environ 1 m pour un comportement ponctuel.

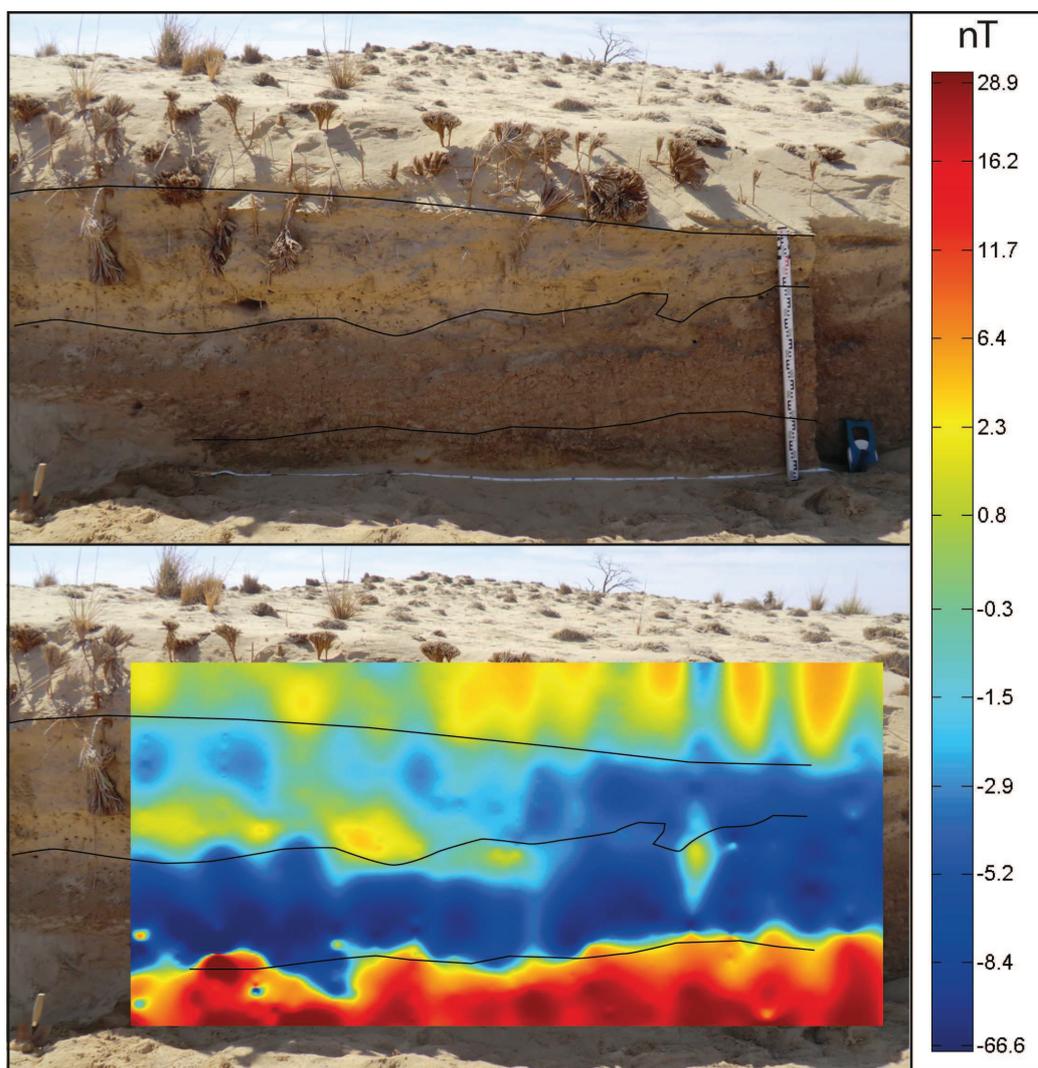


Figure 5.11 – *Portion de la Berme sud du secteur 16 et sa carte d'anomalie. Les traits noirs représentent les principales limites des couches observables macroscopiquement. Du bas vers le haut : dépôts argileux compacts comprenant les lits d'un canal, terre noire et couverture de sable éolien (Photographie Bruno Gavazzi).*

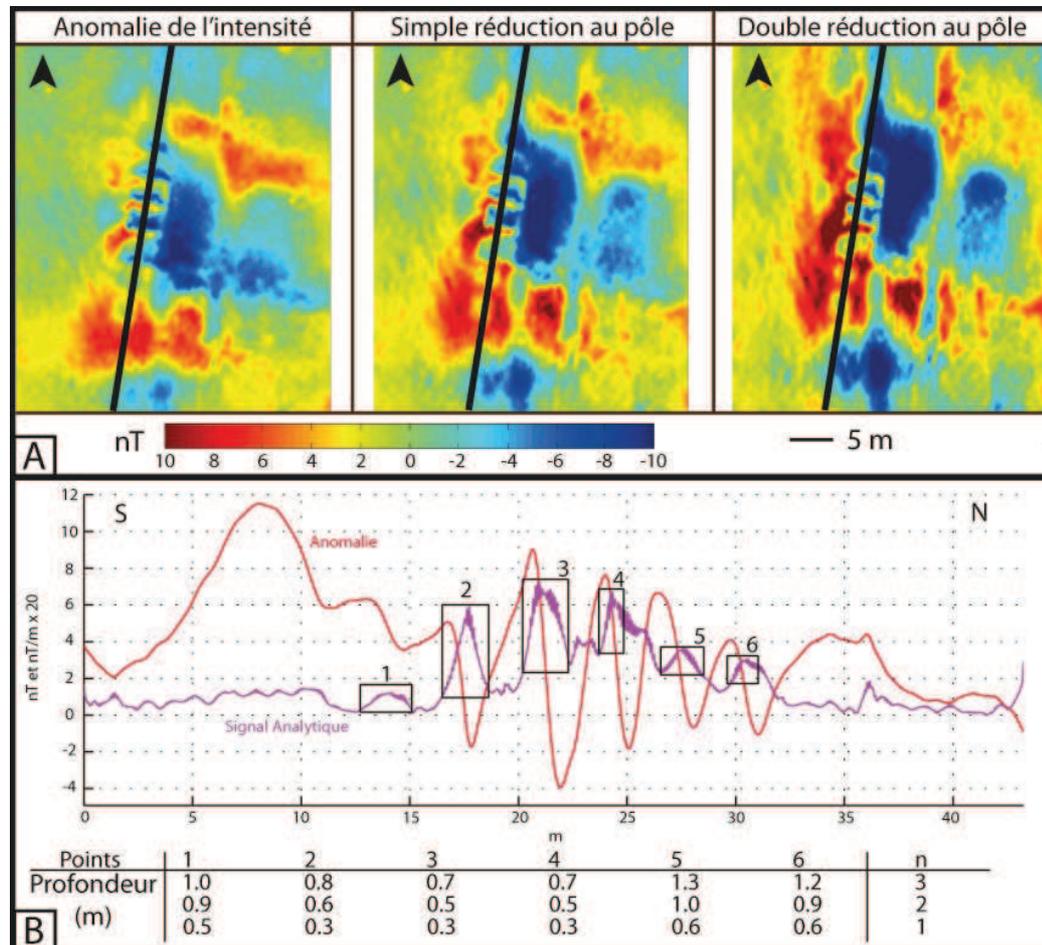


Figure 5.12 – A - Cartes de la zone 2 de l'anomalie de l'intensité, de sa simple et de sa double réduction au pôle. Le trait noir indique la position du profil B. B - Profil d'anomalie extrait de la grille (rouge), son signal analytique (violet) et les résultats du calcul de la profondeur en fonction du facteur de forme n pour chacun des pics délimités par les cadres noirs.

Afin d'atteindre les sources à l'origine des anomalies qui possèdent les longueurs d'onde les plus courtes, un sondage (toujours en cours), dont les limites ont été définies à partir de la carte de la dérivée verticale de l'anomalie double réduite au pôle (Figure 5.13, A), est conduit depuis 2013 par Johan Beha, Frédéric Colin et Catherine Duvette⁶. Ainsi, plusieurs murs en briques crues formant un ensemble de pièces d'une orientation similaire à celle de la

6. Colin (2013a) ; Colin *et al.* (2014).

plate-forme ont été mis au jour (Figure 5.13, B-C). Ces dernières étaient comblées et recouvertes par du sable et les arases des murs se trouvaient enfouies sous quelques dizaines de centimètres de sédiments. On peut alors remarquer que la position horizontale de la plupart des murs est identifiable sur la carte de la dérivée verticale de l'anomalie double réduite au pôle et que la profondeur de l'arase correspond à celle donnée par inversion sur le signal analytique 2D en prenant $n = 1$. Le fait que certains murs ne soit pas visibles sur la carte magnétique peut s'expliquer par un contraste avec l'encaissant trop petit pour être identifié, ce qui peut être dû à une plus faible conservation en élévation ou une largeur trop petite. On peut alors, par analogie, considérer que les anomalies similaires correspondent également à des murs enfouis dans un encaissant sableux, et dont la profondeur de l'arase peut être estimée par inversion sur le signal analytique en prenant comme facteur de forme $n = 1$, soit quelques dizaines de centimètres. Pour vérifier cette affirmation, il est possible de faire une modélisation 3D des murs à partir des résultats de la fouille, de calculer la carte d'anomalie correspondante et de la comparer à celle issue des mesures (Figure 5.14). On remarque alors que les seuls murs ne permettent pas d'expliquer complètement les anomalies, notamment au sud où les longueurs d'ondes sont plus longues pour les mesures que pour le modèle. Cela peut s'expliquer par la présence de sources plus profondes ou un contraste avec l'encaissant différent. On peut en effet noter que certains murs possèdent un soubassement comprenant des blocs de pierre. Dans tous les cas, les murs dont les fondations ont été atteintes reposent sur des nivellement de couches argileuses. Le phénomène de transition nette sable/argile qui se retrouve dans le secteur 15 est également en place ici.

D'après les indices monétaires retrouvés, l'abandon du bâti et le début de son ensablement ont eu lieu aux alentours du 2^e siècle de notre ère⁷. De plus, le mobilier cultuel et les sceaux se référant à la fois aux mythologies grecques et pharaoniques indiquent la présence d'une activité cultuelle postérieure à celle de la période de la plate-forme⁸.

7. Colin *et al.* (2014, p. 197)

8. Colin *et al.* (2014, pp. 198-199)

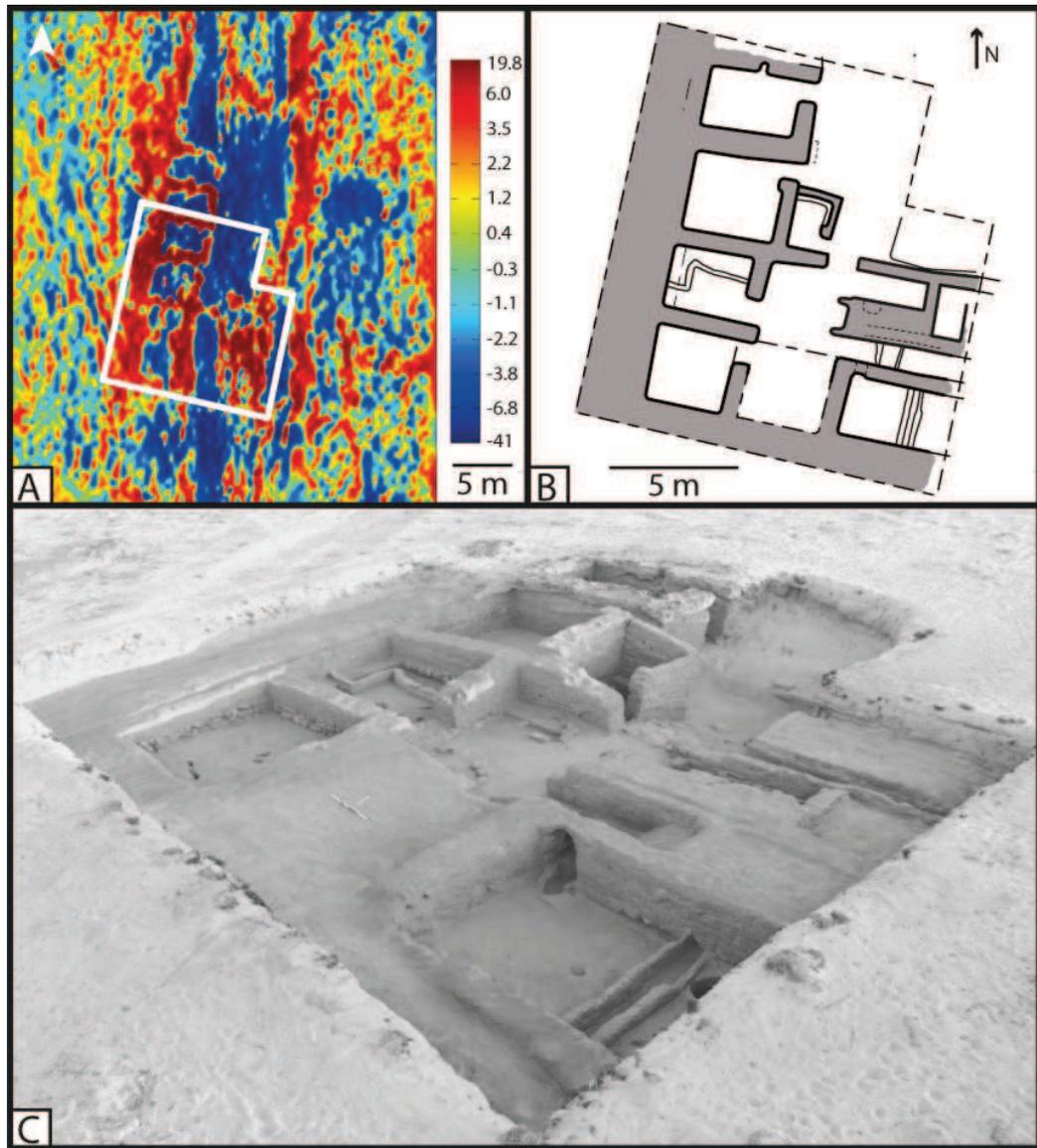


Figure 5.13 – A - Carte de la dérivée à l'ordre 0.8 de la carte d'anomalie magnétique après double réduction au pôle et contour du secteur 16. B - Plan détaillé de la fouille du secteur 16. C - Photographie de la fouille du secteur 16 depuis l'angle sud-est (Frédéric Colin).

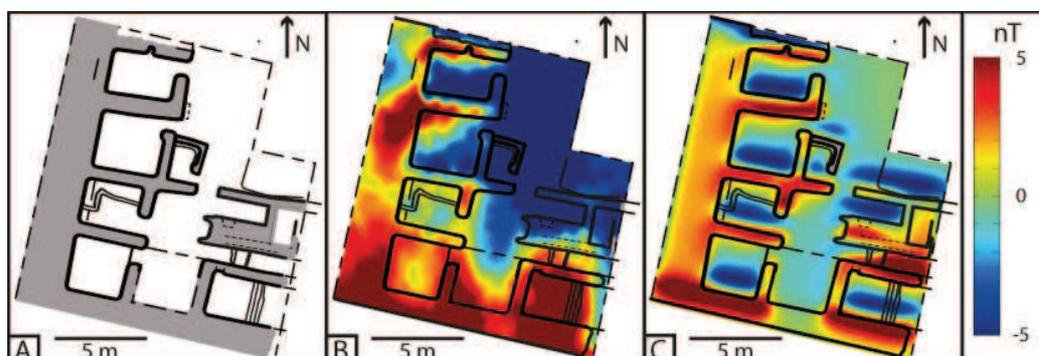


Figure 5.14 – A - Plan de la fouille du secteur 16 (Catherine Duvette). B - Carte de l'anomalie issue des mesures. C - Carte de l'anomalie issue du modèle.

Afin de mieux comprendre l'effet sur les cartes d'anomalie de différents niveaux identifiés lors de la fouilles, trois parois ont été cartographiées. La paroi n° 1 (Figure 5.15) illustre le contraste entre un mur en brique crue et son soubassement comprenant des blocs de pierre. Ce dernier est à l'origine d'une anomalie d'environ 30 nT. On peut également s'apercevoir que l'interface air-brique est à l'origine d'une anomalie de l'ordre de 10 nT. Dans ce cas, l'anomalie mesurée en surface peut se révéler être le résultat d'une combinaison de l'effet du mur et de son soubassement. Ceci pourrait expliquer, au moins partiellement, pourquoi certains murs de la partie sud du secteur 16, qui possèdent un soubassement, semblent former des anomalies de plus grande longueur d'onde que les murs plus au nord qui n'en possèdent pas.

La paroi n° 2 (Figure 5.16) illustre le contraste entre le sable et le mur en brique crue. Ce dernier est à l'origine d'une anomalie d'environ 15 nT, soit d'un ordre similaire à celui entre l'air et la brique de la paroi n° 1. Cela n'est pas surprenant, le sable éolien est très pur et donc composé presque exclusivement de grains ayant un comportement diamagnétique. Le contraste entre les murs et l'encaissant de sable peut donc être considéré comme assez bon pour être à l'origine d'anomalies mesurables. On peut alors conclure que l'absence de signal peut se traduire comme l'absence de structures d'une taille minimale similaire au fouilles du secteur 16.

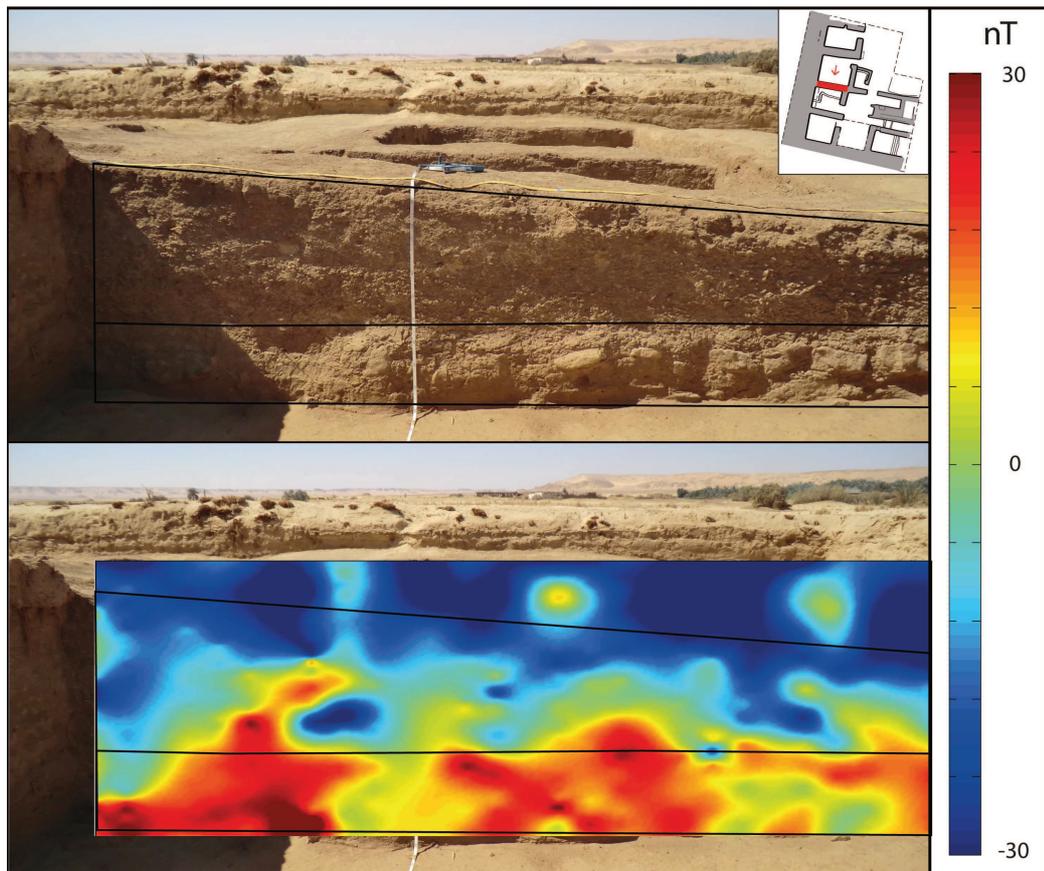


Figure 5.15 – Cartographie sur paroi n° 1 et photographie correspondante (Bruno Gavazzi). La délimitation correspond à l'interface entre une partie inférieure comprenant des éléments en pierre et une partie supérieure en brique crue.

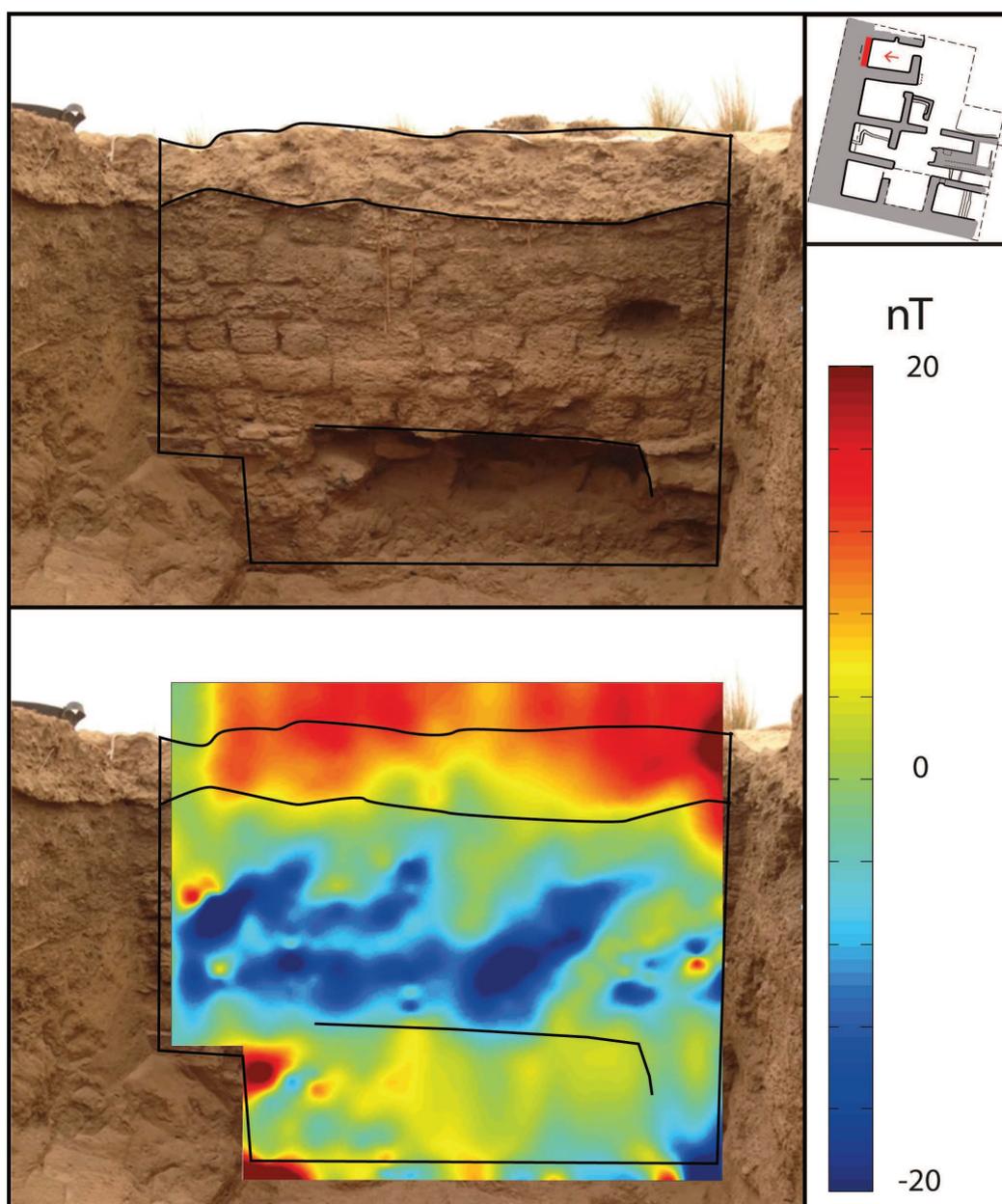


Figure 5.16 – Cartographie sur paroi n° 2 et photographie correspondante (Bruno Gavazzi). La délimitation correspond à l'interface entre la couche supérieure de sable et le mur en briques crues. Le renforcement correspond à un pillage effectué entre les campagnes de terrain de 2013 et 2014.

La paroi n° 3 (Figure 5.17) illustre le contraste entre un mur en briques crues et le niveau d'argiles et de remblais sous-jacents. On peut faire plusieurs observations : tout d'abord, l'interface entre le mur et le sol nivelé est à l'origine d'une anomalie d'environ 25 nT. Ensuite, une deuxième anomalie d'environ 15 nT dessine un deuxième niveau qui ne correspond pas à une interface bien définie sur toute la longueur mais qui semble, comme observable sur la partie droite de la cartographie, corrélée à l'interface entre remblai et couche inférieure non perturbée. Par ailleurs, l'anomalie de forte intensité sur la partie gauche de la carte d'anomalie correspond quant à elle à une cavité dans laquelle une fourmilière a pris place. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de ces contrastes d'aimantation. Ces derniers peuvent être liés à une différence originelle entre les matériaux. On peut en effet très bien imaginer que le remblai est issu d'une réorganisation du sol et une réutilisation d'éléments proches tandis que le matériau pour les briques a pu subir une certaine sélection et provenir d'une source plus éloignée. La différence entre mur et remblai serait alors due à une composition différente tandis que la différence entre remblai et couches non perturbées proviendrait de la réorientation des éléments magnétiques du milieu. Les contrastes d'aimantation ont également pu être acquis lors de processus postérieurs à la construction, par exemple par un lessivage des particules magnétiques lors de pluies ou un phénomène de précipitation/dissolution par une nappe battante.

5.2.3 Zone 3

La zone 3 (Figure 5.9, A-B) vise l'étude de structures interprétées comme du bâti profondément enfoui dans ou sous la dune (catégorie 1). L'observation de la carte d'anomalie double réduite au pôle (Figure 5.18, A) permet d'identifier des structures grossières formant plusieurs lignes et angles droits. Il est alors possible d'établir un profil perpendiculairement à l'une de ces lignes de telle sorte que l'on puisse considérer la source comme source à deux dimensions (Figure 5.18,B). Le calcul du signal analytique 2D du profil ainsi obtenu permet d'identifier la position horizontale de la source qui correspond à un maximum local. Ce dernier est corrélé avec le maximum local de

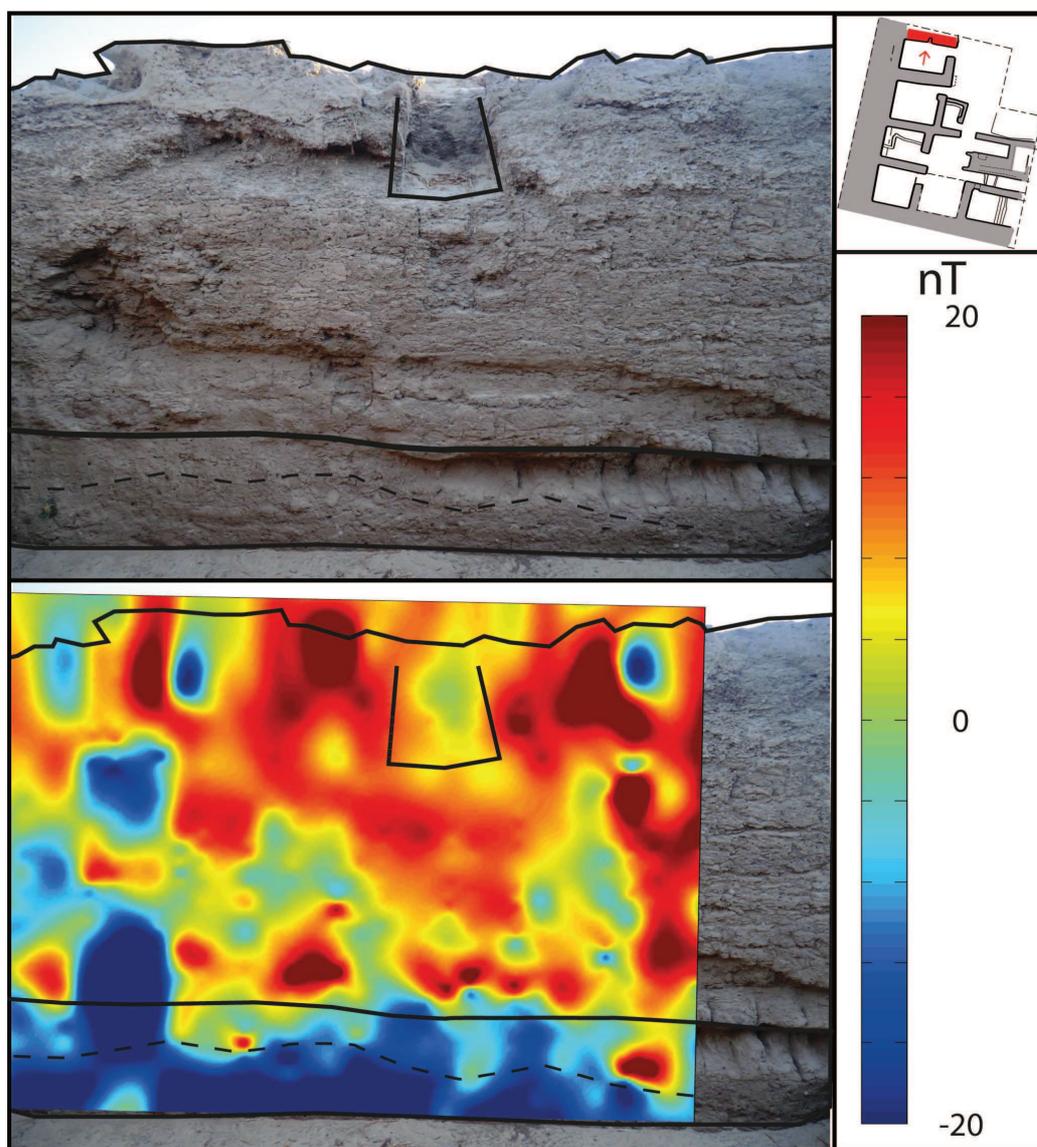


Figure 5.17 – Cartographie sur paroi n° 3 et photographie correspondante (Bruno Gavazzi). La délimitation en trait noir correspond à l'interface entre le mur en briques crues et le remblai sur lequel il est construit. La ligne en pointillés correspond à un contraste observé sur la carte d'anomalie.

l'anomalie double réduite au pôle. La considération de l'aimantation majoritairement induite de la source appliquée pour calculer la double réduction au pôle est donc cohérente avec ces résultats. Le calcul de la profondeur en fonction du facteur de forme par inversion sur le signal analytique donne des résultats entre 1.6 m pour une source prismatique et 3.4 m pour une ligne de section ponctuelle.

Un sondage de vérification a ensuite été conduit (toujours en cours) en 2014 et dirigé par Johan Beha, Frédéric Colin et Christophe Grazi⁹ (Figure 5.18,B). La fouille révèle une stratification sédimentaire simple similaire à ce qui peut être retrouvé dans les deux secteurs précédents : une partie supérieure de sable éolien très pur sur 1 à 1.7 m sur une succession de couches argileuses. Ces dernières, interprétées par les fouilleurs comme des dépôts alluviaux, comprennent une quantité importante de tessons concassés et salinisés dont les éléments identifiables datent principalement du 8^e/7^e siècle avant l'ère commune. L'élément le plus récent, un bord de jarre phénicienne du 4^e siècle avant l'ère commune, permet d'établir cet âge comme le *terminus post quem* d'au moins une des phases de dépôts. Deux lits de briques crues concassées sont également présents au sein de ces couches. Ces découvertes permettent d'interpréter les dépôts comme issus de la destruction et du transport de structures proches par des événements humides catastrophiques successifs au plus tôt à partir du 8^e/7^e siècle jusqu'au moins le 4^e siècle avant l'ère commune. Au niveau de la position horizontale de la source d'anomalie identifiée à l'aide du signal analytique 2D (Figure 5.18, C), une tranchée orientée est-ouest comprenant les restes d'un mur arraché a été mise au jour à environ 2.4 m de profondeur. Ce dernier sépare un sol irrégulier au nord d'un sol aménagé au sud et sa profondeur correspond bien à celle donnée par inversion sur le signal analytique pour un facteur de forme de 2, c'est à dire une plaque. On peut donc en conclure que la source d'anomalie correspond à l'interface entre un intérieur et un extérieur de structures fortement endommagées. Par analogie, on peut considérer que les anomalies similaires (catégorie 1) sont potentiellement autant de traces de bâtiments partielle-

9. Colin *et al.* (2014).

ment ou totalement détruits au sein de coulées argileuses, plusieurs mètres sous la surface de la dune.

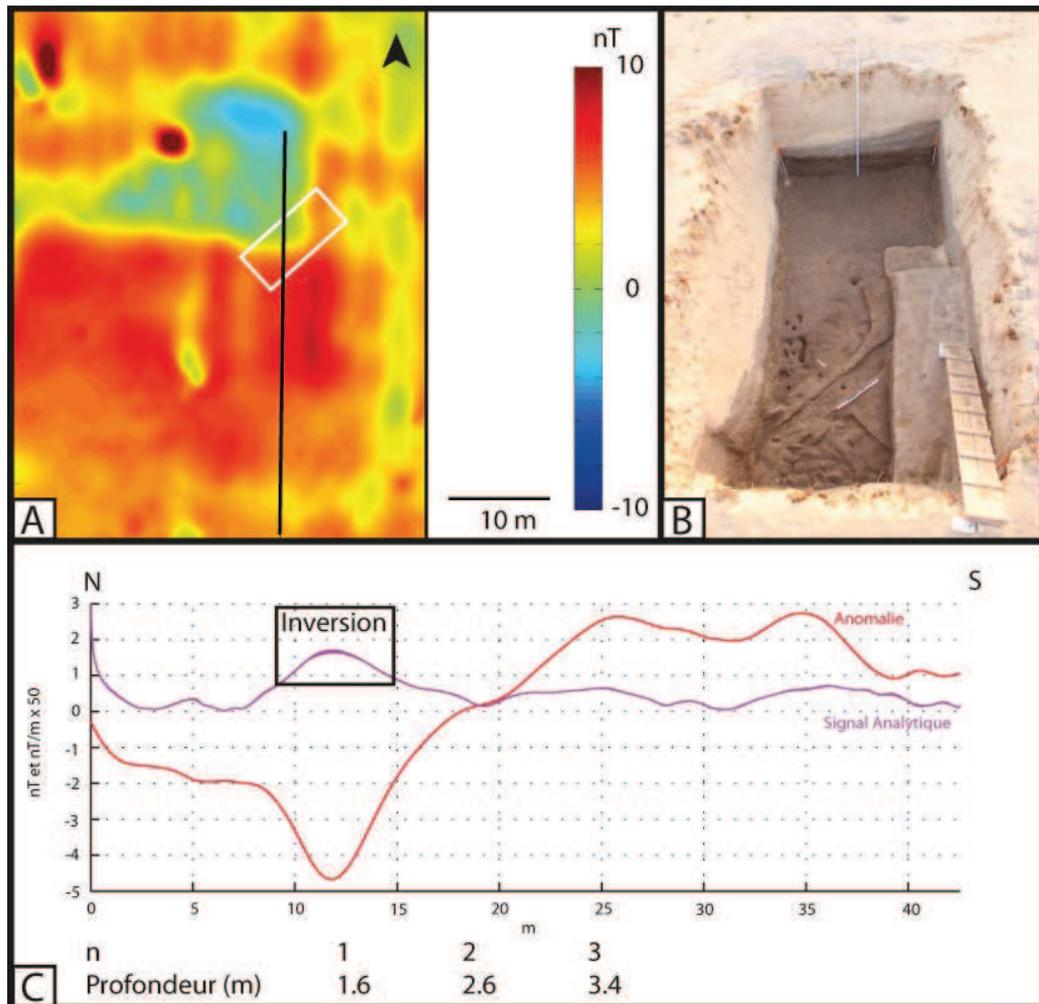


Figure 5.18 – A - Carte de l'anomalie double réduite au pôle de la zone 3. La ligne noire correspond au profil extrait pour inversion et le rectangle au secteur de fouille 17. B - Photographie du sondage du secteur 17 en cours de fouille (Frédéric Colin). C - Profil d'anomalie extrait de la grille (rouge), son signal analytique (violet) et résultats de l'inversion de la profondeur sur le signal analytique (cadre noir) en fonction du facteur de forme n .

5.3 Mesures sur échantillons

Afin de mieux comprendre l'effet des différents niveaux sédimentaires et des matériaux de construction sur les cartes de l'anomalie de l'intensité magnétique, un test très simple de mesures sur des échantillons a été réalisé. L'expérience consiste à poser un capteur fixe au sol et faire passer successivement les différents échantillons, d'un volume de 6.10^{-4} m^3 , selon un profil parallèle nord-sud de telle sorte que le magnétomètre se retrouve à 0.05 m de celui-ci en son milieu. Ainsi, en considérant l'aimantation purement induite, on peut obtenir une idée grossière de l'anomalie de l'intensité générée par chaque matériau (Figure 5.19).

On remarque alors que les briques crues du secteur 16, les dépôts majoritairement argileux avec ou sans éclats du secteur 17, ainsi que la terre noire du secteur 15 sont à l'origine d'anomalies similaires, d'une amplitude comprise entre 4 et 6 nT. Cela semble indiquer une composition proche. On peut alors en déduire que les briques utilisées pour la construction des bâtiments du secteur 16 ont pu être réalisées à partir de l'argile présente sur place. On s'aperçoit également que la brique crue de la plate-forme, le bloc de grès et le sable éolien présentent des anomalies similaires inférieures au nano-tesla, ce qui semble indiquer une aimantation faible comparée aux autres éléments. Pour le sable et le grès, cela s'explique facilement par leur composition assez pure. En revanche, la différence entre la brique de la plate-forme et les briques du secteur 16 ne peut s'expliquer que par une composition différente, soit originalement, l'argile utilisée pour la plate-forme semble en effet provenir du socle rocheux, soit par des processus ultérieurs, comme un lessivage des particules magnétiques lors de pluies qui pourraient alors être liées aux événements hydrauliques destructeurs observés sur le site. Finalement, l'argile compacte du fond du secteur 15 présente une anomalie de l'ordre de 2 nT qui n'a pas de similitude avec les autres échantillons. Ce résultat, bien qu'issu d'un seul échantillon, semble indiquer une plus faible aimantation que les argiles placées stratigraphiquement au-dessus, ce qui suggère une composition différente qui peut s'expliquer par les battements saisonniers d'une nappe

phréatique d'élévation supérieure à l'actuelle, en accord avec les traces d'hydromorphie observées dans la couche¹⁰.

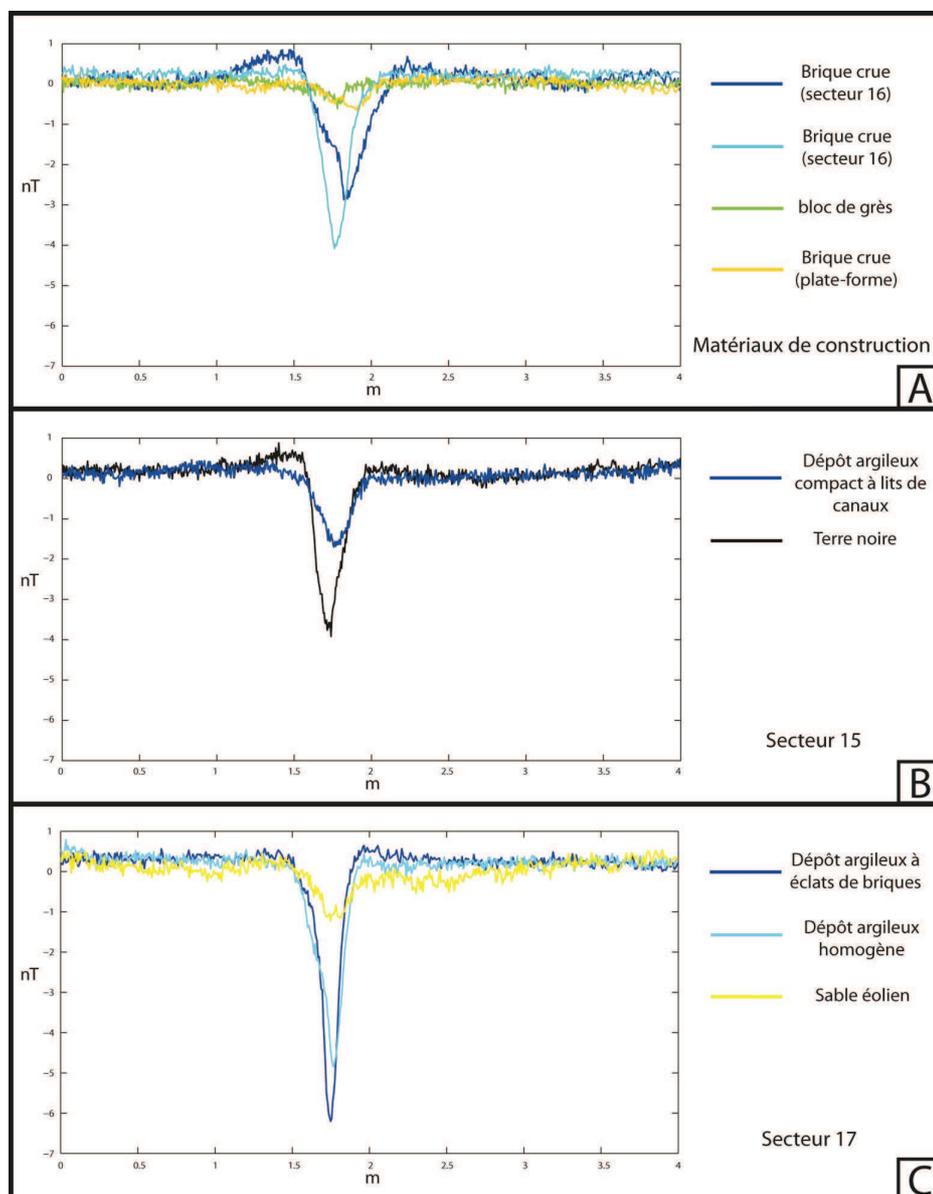


Figure 5.19 – Profils de l'anomalie de l'intensité magnétique d'un volume de $6 \cdot 10^{-4} m^3$ de différents matériaux passés à vitesse constante devant un capteur. A - Matériaux de construction provenant du secteur 16 et de la plate-forme. B - Matériaux provenant du secteur 15. C - Matériaux provenant du secteur 17.

10. Colin *et al.* (2014, p. 199).

5.4 Interprétation générale du site

Les différentes conclusions issues des discussions des sections précédentes de ce chapitre permettent d'apporter une contribution à la compréhension générale du site de *Qasr 'Allam*. Ainsi, l'étude vient confirmer les observations faites en fouille selon lesquelles l'étendue du bâti est beaucoup plus large que ce qui peut être vu en surface (Figure 5.20). Il est en effet possible d'affirmer que les vestiges de bâti s'étendent sur une surface d'au moins 160 000 m² dont la majeure partie est aujourd'hui complètement recouverte de sédiments. Parmi ces vestiges, deux niveaux ont pu être identifiés et les fouilles ciblées semblent indiquer une utilisation culturelle du site au moins jusqu'au 2^e siècle¹¹.

Les résultats permettent également de mettre au jour un système d'irrigation complexe dont une partie au moins est probablement contemporaine du bâti¹² (Figure 5.20). Il est alors intéressant de noter qu'une source possible de l'eau exploitée provienne du secteur aujourd'hui asséché et nommé *Al-'Ayoun* (« les sources »), situé à quelques centaines de mètres au sud du site¹³.

Par ailleurs, les données magnétiques et les premiers résultats des fouilles associées semblent confirmer une hypothèse construite au long de plus de dix années d'études : le site a connu un changement environnemental humide/aride soudain, traduit par une limite nette entre des dépôts argileux, associés en partie à des événements catastrophiques qui semblent avoir endommagé fortement les bâtiments, à des dépôts de sable éolien¹⁴. Cette transition qui ne correspond à rien de connu est en cours d'étude. Certains indices permettent néanmoins d'affirmer qu'elle devrait se situer entre le 4^e siècle avant l'ère commune¹⁵ et le 2^e siècle de notre ère¹⁶. Dès lors, on peut se

11. D'après les indices monétaires en cours d'analyse (Colin *et al.* 2014, p. 197).

12. D'après la fouille du secteur 15 (Colin & Duvette 2012, pp.163-165).

13. Colin & Duvette (2012, p. 164).

14. Colin *et al.* (2014, pp. 196-201).

15. La plate-forme est réutilisée à partir environ du 4^e siècle avant l'ère commune comme une nécropole, les dépôts contemporains sont alors argileux. Pour une présentation du contexte archéologique, voir Adam & Colin (2012).

16. Les dépôts contemporains à l'utilisation des bâtiments du secteur 16, abandonnés au cours du 2^e siècle, sont exclusivement constitués de sable (Colin *et al.* 2014, p. 197).

poser la question de l'influence anthropique sur ce phénomène ainsi que des réactions des populations face à ce changement environnemental. Un début de réponse peut alors être trouvé à travers les premiers résultats de la fouille des déblais d'un puits mis au jour au pied de l'angle sud-ouest de la plateforme. Ces derniers indiquent plusieurs phases de creuses¹⁷, ce qui pourrait indiquer une tentative d'adaptation à un abaissement du niveau de la nappe.

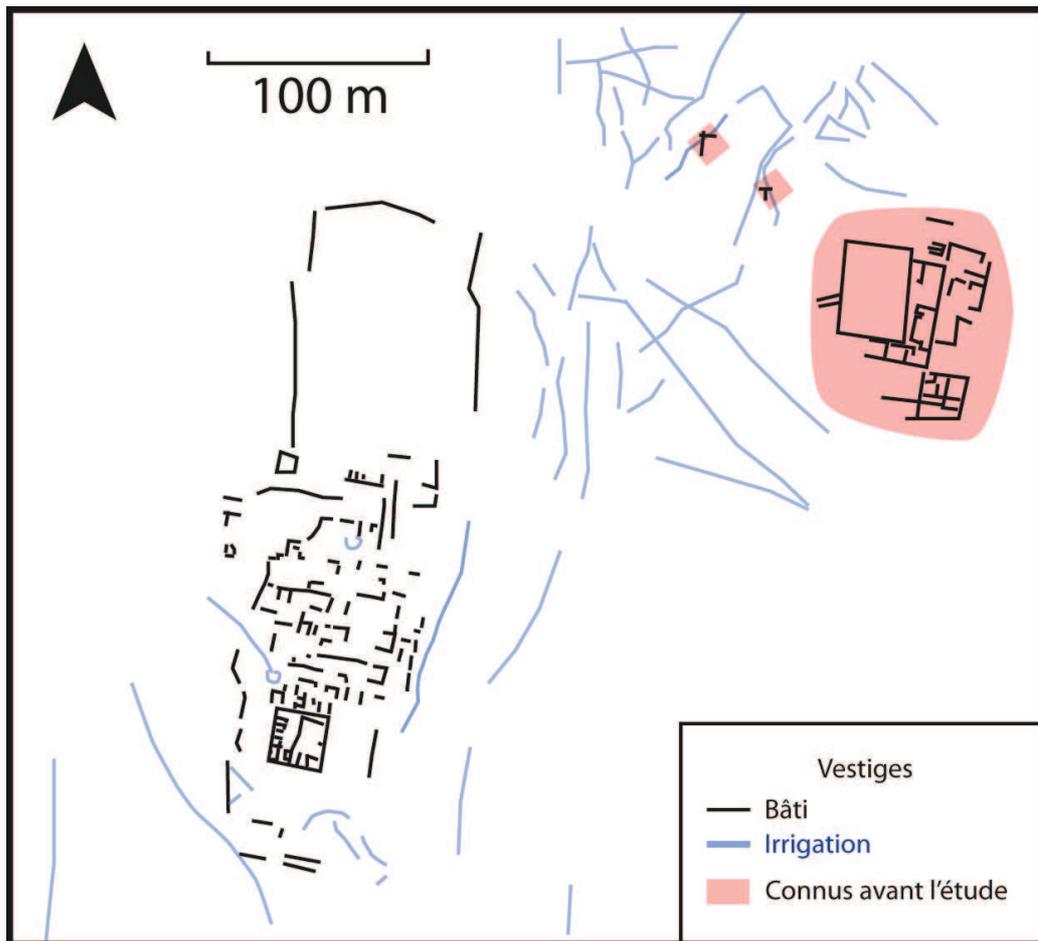


Figure 5.20 – Carte interprétative du complexe cultuel de Qasr 'Allam présentant les éléments de bâti et d'irrigation connus à la suite de l'étude. La zone rouge représente les vestiges connus avant cette dernière.

17. Colin & Duvette (2012, pp. 164-165); Colin *et al.* (2014, p. 201).

Conclusions générales et perspectives

Les objectifs de ce travail étaient multiples. D'un point de vue archéologique, le but était de pouvoir localiser et caractériser des éléments d'architecture et d'irrigation dont aucune trace n'est visible en surface, le tout à grande échelle dans un contexte accidenté. D'un point de vue géophysique, le but était de développer une méthode d'acquisition permettant une échelle et une densité de mesures modulables, plus rapide et facile à mettre en place que celle des dispositifs commerciaux, ainsi que des outils d'analyse spécifiques au contexte archéologique permettant d'obtenir des informations supplémentaires sur les vestiges.

La mesure des trois composantes du champ à l'aide de magnétomètres à vanne de flux a permis de mettre en place une procédure permettant à la fois l'étalonnage des capteurs et la compensation du matériel aimanté du dispositif de mesure. Trois prototypes ont été mis au point pour répondre à des densités et échelles d'acquisition différentes. Ainsi, ces derniers se sont révélés capables de mettre au jour au minimum autant d'informations sur la composition du sous-sol que les dispositifs commerciaux habituellement utilisés, tout en améliorant la praticabilité et la vitesse d'acquisition des mesures. Il devient ainsi possible de cartographier des zones auparavant inaccessibles (terrains accidentés, présence de végétation, *etc.*). De plus, la modularité du système mis en place permet d'opérer à des échelles de résolution spatiale et de surface bien supérieures à ce qui peut être généralement vu en contexte archéologique, de la prospection décimétrique sur quelques dizaines de mètres carrés à la cartographie demi-métrique sur des dizaines de mil-

liers. En utilisant cette méthode, la vitesse de mesure pourrait facilement être augmentée en multipliant le nombre de capteurs. On peut également imaginer une échelle de mesure encore plus large et moins dépendante de la topographie et de la végétation à l'aide de drones. Le positionnement peut également être amélioré. En effet, la précision d'une antenne *GPS* classique devient problématique en cas de faible couverture satellitaire ou d'obstruction du signal (végétation, bâtiments). Deux solutions matérielles simples peuvent résoudre ce problème : l'utilisation d'une base afin de développer un système de positionnement global différentiel ou l'utilisation d'un système de positionnement relatif à l'aide d'un tachéomètre à suivi automatique de cible. Ainsi, une précision de positionnement centimétrique peut être obtenue.

L'étude de différents outils d'interprétation issus de la théorie du potentiel a permis de définir les conditions et la pertinence de leur utilisation dans le contexte de l'étude ainsi que plus généralement en archéologie. Une méthode d'inversion de la profondeur sur le signal analytique 2D en fonction de la forme de la source a également été mise au point. Les différentes méthodes utilisées et les considérations appliquées ont ensuite été validées par les preuves-terrains qu'apportent les fouilles archéologiques. Ainsi, l'application de ces dernières se révèle être un outil puissant pour obtenir les positions horizontale et verticale des sources à partir des cartes d'anomalie magnétique sur le site de *Qasr 'Allam*. Il n'existe cependant pas de solution pouvant être généralisée et chaque technique requiert des contraintes plus ou moins fortes qui dépendent fortement du contexte archéologique et environnemental du site d'étude. Une piste qui pourrait s'avérer intéressante pour apporter des nouveaux outils interprétatifs voire de contourner ce problème est l'utilisation des champs complexes. En effet, tout comme le domaine spectral, le domaine complexe pourrait permettre de simplifier et de mieux comprendre les propriétés de certaines équations.

Les différents résultats des cartographies de surface et des parois, des fouilles ciblées et des mesures sur échantillons ont permis d'identifier des structures hydrauliques sur tout le site ainsi que du bâti sous la dune de

sable à l'ouest qui témoignent de plusieurs niveaux d'occupation. Il a alors été possible de confirmer une étendue du complexe culturel beaucoup plus large que la partie visible en surface : ce dernier occupe en effet au minimum 160 000 m². La présence de canaux d'irrigation témoigne de l'exploitation contemporaine de sources proches pour l'agriculture du territoire. Les indices monétaires retrouvés en fouille indiquent qu'une activité culturelle était toujours présente au moins jusqu'au 2^e siècle de l'ère commune. De nouvelles données ont également été apportées sur l'aridification rapide ayant lieu entre le 4^e siècle avant l'ère commune et le 2^e siècle de notre ère. L'échelle spatiale et les mécanismes de cette transition, qui a eu lieu vraisemblablement à l'époque romaine ou proche de cette dernière, ne sont pour l'instant pas connus et en cours d'étude par une équipe multi-disciplinaire. Pour mieux comprendre ce phénomène, il serait intéressant de conduire des études paléoenvironnementales et paléoclimatiques à différentes échelles dans et autour de l'oasis. Ces dernières pourraient permettre d'améliorer les connaissances sur le rapport entre l'homme et son environnement dans l'oasis mais aussi sur les évolutions climatiques du Sahara pour des périodes suivant l'optimum holocène qui sont aujourd'hui peu connues. Une autre question qui reste à explorer concerne l'acquisition de l'aimantation par les matériaux. En effet, les différents résultats suggèrent qu'à la fois la composition initiale et des processus postérieurs aux dépôts sont à l'origine des contrastes d'aimantation du sous-sol. Une étude plus approfondie permettrait donc une meilleure compréhension des événements et environnements auxquels le site a été soumis, tout en apportant de nouvelles informations sur l'archéomagnétisme local.

Les objectifs initiaux de cette étude ont donc été remplis, les vestiges archéologiques ont pu être identifiés et de nouvelles informations essentielles à la compréhension du site ont pu être acquises à l'aide d'une méthode géophysique inédite et adaptée au contexte particulier. Ainsi, ces résultats ont permis d'établir en 2014, en collaboration avec les autorités locales, un secteur protégé d'environ 640 000 m² afin de préserver les vestiges, actuellement toujours enfouis sous la dune, d'une destruction par l'activité agricole.

Appendices

Annexe A

Liste des variables utilisées

Rappel : système de référence

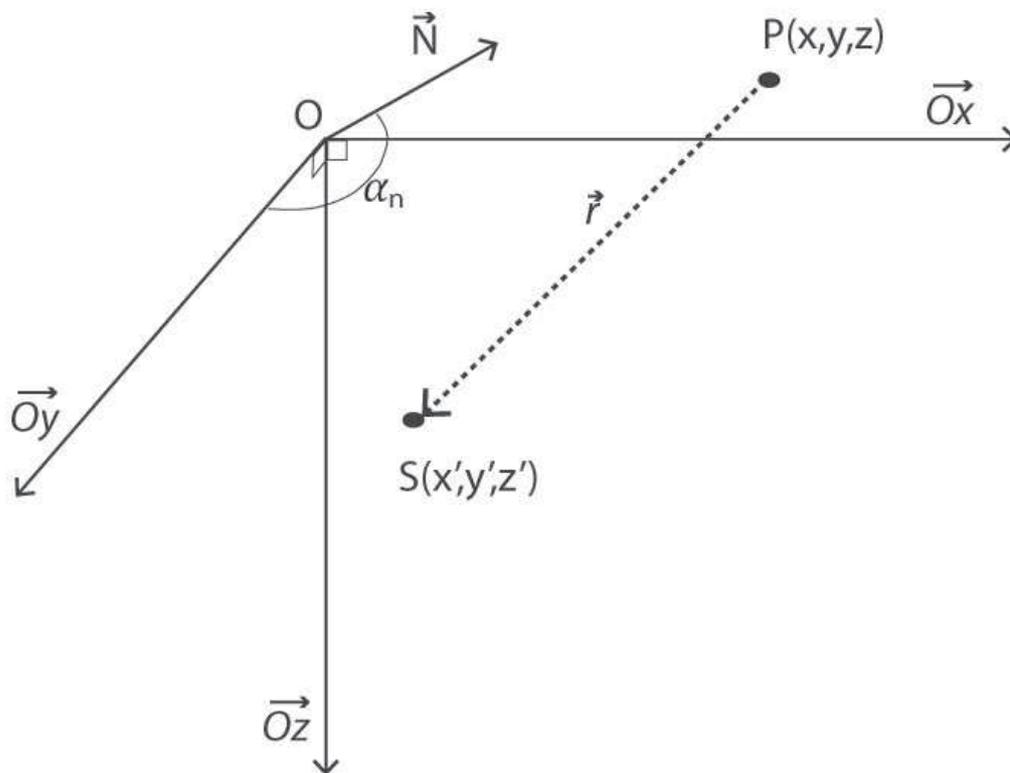


Figure A.1 – Repère cartésien utilisé au cours de l'étude. L'angle entre le Nord magnétique et l'axe Oy est noté α_n . Le vecteur entre le point d'observation $P(x, y, z)$ et la source $S(x', y', z')$ est noté \vec{r} .

Scalars

α = angle entre \vec{R} et \vec{A} .

$\alpha_{m,r} = \cos(I_{m,r}) \sin(\alpha_n - D_{m,r})$.

α_n = angle entre le nord et l'axe Oy .

β = angle entre \vec{R} et \vec{B} .

$\beta_{m,r} = \cos(I_{m,r}) \cos(\alpha_n - D_{m,r})$.

γ = angle entre \vec{r}_1 et \vec{r}_2 .

$\gamma_{m,r} = \sin(I_{m,r})$.

δ = direction quelconque de cosinus directeur a, b, c .

Δ_φ = Laplacien du potentiel.

ΔC = Différence entre l'anomalie et son approximation.

ΔC_{max} = valeur maximale de ΔC .

ΔV = élément de volume.

$\eta = \alpha_m \gamma_r + \gamma_m \alpha_r$.

θ = angle entre la verticale et la face finie du prisme semi-fini.

λ = constante dépendante de \vec{M} et \vec{R} .

$\mu = \alpha_m \alpha_r - \gamma_m \gamma_r$.

ξ = erreur entre mesures et modèle.

χ = susceptibilité magnétique.

φ = potentiel magnétique scalaire.

$\hat{\varphi}$ = potentiel spectral.

ω = pulsation.

a, b, c = cosinus directeurs de δ .

C = anomalie de l'intensité du champ magnétique.

\hat{C} = anomalie de l'intensité du champ magnétique dans le domaine spectral.

C_1 = approximation de l'anomalie de l'intensité du champ magnétique.

C_m = constante d'ajustement. 1 en CGS, 10^{-7} en SI.

d_m = mesures dans le problème inverse.

d_p = paramètres dans le problème inverse.

$D_{b,m,r}$ = déclinaison du vecteur \vec{B} , \vec{M} ou \vec{R} .

f = fréquence.

g = gradient total.

g_{max} = valeur maximale de g .

g_r = rapport de g sur g_{max} .

G = opérateur reliant d_m à d_p .

$h(k)$ = fonction spatiale de la variable k .

$H(f)$ ou $H(\omega)$ = fonction spectrale de la variable f ou ω .

i = nombre imaginaire tel que $i^2 = -1$.

$I_{b,m,r}$ = inclinaison du vecteur \vec{B} , \vec{M} ou \vec{R} .

k = variable spatiale quelconque.

L = largeur du prisme.

n = indice, dimension ou ordre, la valeur est donnée pour chaque équation.

N = nombre d'échantillons.

N_m = nombre de mesures.

N_p = nombres de paramètres.

Ox, Oy, Oz = axes du repère orthonormé.

p = pendage du prisme infini par rapport à l'horizontale, positif dans le sens horaire.

P = profondeur de la source.

$P(x, y, z)$ = point d'observation de coordonnées x, y et z .

$Q = \cos \theta \left(\gamma \cos \theta - \sin \theta \log \frac{r_1}{r_2} \right)$.

$r_h = \sqrt{r_x^2 + r_y^2}$.

$r_v = \sqrt{r_x^2 + r_z^2}$.

s = carré de la norme du signal analytique.

s_{max} = valeur maximale de s .

s_r = rapport de s sur s_{max} .

$S(x', y', z')$ = source de coordonnées x', y' et z' .

S_m = somme du carré des erreurs ξ .

S_p = expression spectrale de la source ponctuelle.

$|SA|$ = norme du signal analytique.

$T = \cos \theta \left(\gamma \sin \theta - \cos \theta \log \frac{r_1}{r_2} \right)$.

$TILT$ = Tilt.

u, v, w = pulsations associées à x, y, z .

V = volume.

\hat{V} = volume spectral.

x, y, z = coordonnées spatiales du point d'observation.

x', y', z' = coordonnées spatiales de la source.

z_0 = niveau du plan d'observation horizontal.

Vecteurs

Pour tout vecteur quelconque \vec{X} , on note X sa norme; X_x , X_y et X_z les projections respectivement sur les axes Ox , Oy et Oz .

\vec{A} = champ magnétique associé à \vec{m} ou \vec{M} .

\vec{A}_i = partie induite de \vec{A} .

\vec{A}_r = partie rémanente de \vec{A} .

\vec{B} = champ magnétique terrestre.

\vec{m} = moment magnétique dipolaire.

\vec{M} = aimantation.

\vec{r} = vecteur distance entre P et S .

\vec{r}_1 et \vec{r}_2 = vecteurs distance des extrémités de la face finie du prisme semi-fini.

\vec{R} = champ magnétique régional (modèle).

Annexe B

Fiche technique *Bartington* *Mag-03*

Mag-03
Three-Axis Magnetic Field Sensors

Mag-03 Three-Axis Magnetic Field Sensors

These compact, high performance fluxgate sensors with integral electronics provide precision measurements of static and alternating magnetic fields in three axes. They are available in a variety of enclosures. Powered from any $\pm 12V$ supply, outputs are in the form of three analogue voltages from 0 to $\pm 10V$, proportional to B_x , B_y and B_z .

The sensors have a wide range of applications in physics, bioelectromagnetics, geophysical exploration and defence.

Bartington Instruments can supply a range of mounting accessories, and cables for connection to power supply and data acquisition units. Calibration check units are available for the complete range of sensors, as is a full calibration service.



Features

- Wide choice of enclosure types: square section, cylindrical, titanium shielded, unpackaged, two part, independent elements.
- Three noise levels available:
 - Low noise 'L': $< 6 \text{ pTrms}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 1Hz
 - Standard: 6 to $\leq 10 \text{ pTrms}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 1Hz
 - Basic: > 10 to $20 \text{ pTrms}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 1Hz
- Measuring ranges from $\pm 70 \mu\text{T}$ to $\pm 1000 \mu\text{T}$.
- Bandwidth typically 3kHz (5kHz for Mag-03IEv1&2 on request).

Typical Applications

- Measurement of disturbances in the geomagnetic field.
- Use as feedback sensors in active magnetic field shielding systems.
- Measurement of the effectiveness of passive shielding.
- Orientation sensing.

Product Identification

To suit specific needs, Mag-03 sensors can be supplied in a wide range of enclosures with choices of noise level and measuring range. Products are specified as 'Mag-03' followed by: the enclosure code; noise level code; and measuring range in μT .

For example, from the table below:

- Mag-03MSL70 is a low noise sensor with a square section enclosure and a range of $\pm 70\mu\text{T}$.
- Mag-03MC1000 is a standard sensor with a cylindrical enclosure and a range of $\pm 1000\mu\text{T}$.
- Mag-03MSESB250 is a basic sensor with a square section enclosure environmentally sealed to IP64 and a range of $\pm 250\mu\text{T}$.

Note: For some Mag-03 magnetometers (Mag-03 MCFL, MCTP, MCUP, IE), it will be necessary to specify the lead lengths. For example, Mag-03MCFL250-1000 is a Mag-03MCFL with a range of $250\mu\text{T}$ and flying leads of 1000mm.

Enclosure code	Enclosure type	Description	Noise level ¹	Measuring range in μT ²
MC ³	Cylindrical		B – Basic L – Low	70 100 250 500 1000
MCES ⁴		Environmentally sealed to IP64		
MCFL ⁵		Connections via flying leads		
MCT		Titanium shielded		
MCUP		Unpackaged: moulded cylindrical sensor; electronics block with flying leads		
MCTP		Two-part construction: separate sensor and cylindrical electronics enclosure		
MS ⁶	Square section		B – Basic L – Low	70 100 250 500 1000
MSES ⁷		Environmentally sealed to IP64.		
MSS ⁸		Submersible to 2000 metres. IP68 rated.		
IE ⁹	IE sensor	Sensor with the three sensing elements on flying leads.		
IEv1		9-way 'D' type connector and cable from the electronics enclosure.		
IEv2		25-way 'D' type connector and cable from the electronics enclosure.		
IEHV ¹⁰		Suitable for use in a high vacuum chamber.		

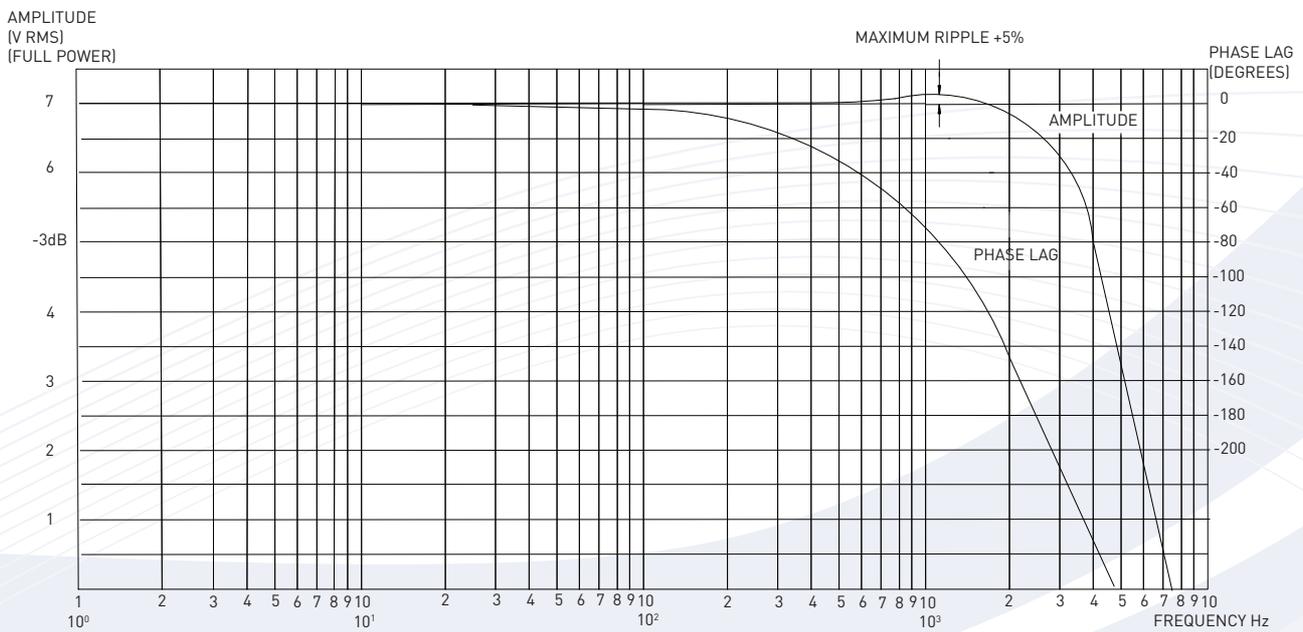
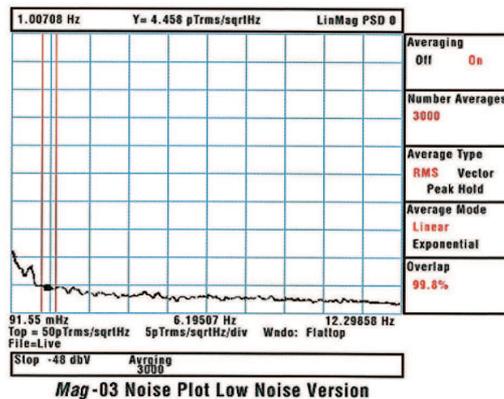
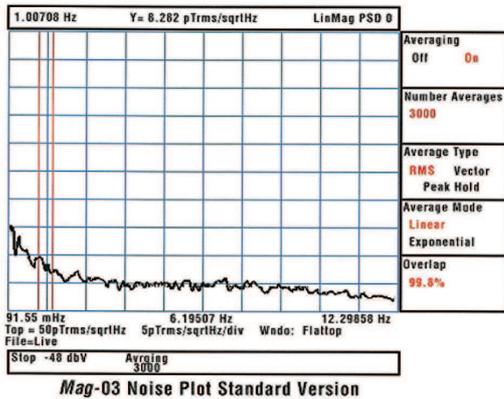
1. See specifications table below for key. If no noise level is specified then sensor is Standard noise.
2. Version L has a measuring range of $70\mu\text{T}$ or $100\mu\text{T}$ only.
3. Sensing elements and electronic circuitry housed in enclosure. Suitable for use in shallow boreholes but not sealed against ingress of water. Mounting bracket available as option.
4. Enclosure features rugged, seven way sealed connector.
5. No connector. Seven way connecting cable moulded within enclosure with a strain relief grommet.
6. Sensing elements mounted with reference to the base which acts as a datum face.
7. Rugged, seven way sealed connector. Sealing gasket may be required on base of the sensor.
8. Pressure housing manufactured from polyacetal for minimum water absorption. Seven way marine type connector moulded to a seven way polyurethane jacketed marine cable. Cable supplied to customer requirement up to a length of 600 metres.
9. Shortened cylindrical enclosure for electronics. Sensing elements individually potted and connected to electronics assembly with flying leads with standard length of 750mm so that user can position individual elements independently if required. Sensing elements can be arranged around a sensitive volume where space is restricted.
10. Independent elements enclosed in glass tubes with epoxy filling. Re-solderable terminal block in sensor element cables allows connection through a vacuum chamber bulkhead.

Mag-03 Specifications

Performance	
Number of axes	Three
Polarity	+ve non-inverting output when pointing North
Bandwidth	3kHz (5kHz for Mag-03IEv1&2 on request)
Measurement noise floor: basic version standard version low noise version	>10 to 20pTrms/√Hz at 1Hz 6 to ≤10pTrms/√Hz at 1Hz <6pTrms/√Hz at 1Hz
Scaling error	<±0.5%
Orthogonality error	<0.5° (<0.1° for Mag-03MS and Mag-03MSES)
Alignment error (Z axis to reference face)	<0.1° (Mag-03MS and Mag-03MSES only)
Single sensor axis to body	<3.5° (Mag-03IE sensors only)
Linearity error	<0.0015%
Frequency response	0 to 1kHz maximally flat, ±5% maximum at 1kHz
Excitation breakthrough	<20mV pk-pk at 16kHz (3kHz bandwidth) <400mV pk-pk at 16kHz (5kHz bandwidth)

Scaling Dependent Parameters					
Measuring range (μT)*	±70	±100	±250	±500	±1000
Scaling (mV/μT)	143	100	40	20	10
Scaling temperature coefficient (ppm/°C)	±15	±20	±50	±100	±200
Offset error (nT)	±5	±5	±12	±25	±50
Offset temperature coefficient (nT/°C)	±0.1	±0.1	±0.2	±0.33	±0.6

* Low noise version has range of 70μT or 100μT only



Mag-03 typical frequency dependent amplitude and phase response

Mag-03 Three Axis Magnetic Field Sensors

Environmental and Mechanical		
	Mag-03MC	Mag-03MCES
Operating temperature range: continuous intermittent	-40°C to +70°C -40°C to +85°C	-40°C to +70°C -40°C to +85°C
Environmental protection	IP51	IP64
Dimensions (ø x L)	25 x 202mm	25 x 207mm
Weight	85g	100g
Enclosure material	Reinforced epoxy	Reinforced epoxy
Connector	Hirose RM15TRD10P	Amphenol 62GB-51T10-7P
Mating connector	Hirose RM15TPD10S	Amphenol 62GB-16J10-7S
Mounting	Mounting bracket or tripod adapter available	Mounting bracket or tripod adapter available
	Mag-03MCFL	Mag-03MCT
Operating temperature range: continuous intermittent	-40°C to +70°C -40°C to +85°C	-40°C to +70°C -40°C to +85°C
Environmental protection	IP51	IP51
Dimensions (ø x L)	25 x 211mm	25 x 202mm
Weight	80g	95g
Enclosure material	Reinforced epoxy	Titanium
Connector	Flying leads 500mm length ^{2,3} (Up to 5000mm length to order)	Hirose RM15TRD10P
Mating connector		Hirose RM15TPD10S
Mounting	Mounting bracket or tripod adapter available	Mounting bracket or tripod adapter available
	Mag-03MCTP	Mag-03MCUP
Operating temperature range: continuous intermittent	-40°C to +70°C -40°C to +85°C	-40°C to +70°C -40°C to +85°C
Environmental protection	IP51	Unpackaged conformal coating
Dimensions (mm)	Electronics: ø25 x 115 length Sensor: ø20 x 54 length Sensor-electronics cable: 1000 length ³ (up to 5000 length to order)	Electronics (WHL): 21 x 12 x 80 Sensor: ø20.9 x 56 length Sensor-electronics cable: 610 length ³ (up to 5000 length to order)
Weight	80g	80g
Enclosure material	Sensor: reinforced epoxy Electronics: aluminium alloy	Sensor: reinforced epoxy Electronics: conformal coating
Connector	Hirose RM15TRD10P	Flying leads 500mm length ^{2,3} (up to 5000mm length to order)
Mating connector	Hirose RM15TPD10S	
Mounting	Mounting bracket or tripod adapter available ¹	
	Mag-03MS	Mag-03MSES
Operating temperature range	-40°C to +70°C	-40°C to +70°C
Environmental protection	IP51	IP64
Dimensions (W x H x L) (mm)	32 x 32 x 152	32 x 32 x 166
Weight	160g	160g
Enclosure material	Reinforced epoxy	Reinforced epoxy
Connector	ITT Cannon DEM-9P-NMB	Amphenol 62GB-12E10-7P
Mating connector	ITT Cannon DEM-9S-NMB	Amphenol 62GB-16J10-7S ⁴
Mounting	2 x M5 fixing holes. Tripod adapter available	2 x M5 fixing holes. Tripod adapter available

	Mag-03IE	Mag-03IEHV
Operating temperature range: continuous intermittent	-40°C to +70°C -40°C to +85°C	-40°C to +70°C -40°C to +85°C
Environmental protection	IP51	For use in high vacuum chambers
Dimensions (mm)	Electronics: ø25 x 115 length Sensor: ø8 x 30 length Sensor-electronics cable: 750 ^{2,3} length (up to 5000 length to order)	Electronics: ø25 x 115 length Sensor: ø6.5 x 30 length Inner cable: 1100 ^{2,3} length (up to 5000 length to order) Outer cable: 140 length Inner and outer cable joined by re-solderable terminal block
Weight	80g	80g
Enclosure material	Sensors: alumina cylinder Electronics: aluminium alloy	Sensors: glass tube with epoxy filling Electronics: aluminium alloy
Connector	Hirose RM15TRD10P	Hirose RM15TRD10P
Mating connector	Hirose RM15TPD10S	Hirose RM15TPD10S
Mounting	Mounting bracket or tripod adapter available ¹	Mounting bracket or tripod adapter available ¹

	Mag-03IEv1	Mag-03IEv2
Operating temperature range: continuous intermittent	-40°C to +70°C -40°C to +85°C	-40°C to +70°C -40°C to +85°C
Environmental protection	IP51	IP51
Dimensions (mm)	Electronics: ø25 x 105 length Sensor: ø8 x 30 length Sensor-electronics cable: 750 length ^{2,3} (up to 5000 length to order)	Electronics: ø25 x 105 length Sensor: ø8 x 30 length Sensor-electronics cable: 750 length ^{2,3} (up to 5000 length to order)
Weight	80g	80g
Enclosure material	Sensors: alumina cylinder Electronics: aluminium alloy	Sensors: alumina cylinder Electronics: aluminium alloy
Connector	9-way 'D' type on a 5m cable	25-way 'D' type on a 5m cable
Mating connector	9-way 'D' type	25-way 'D' type
Mounting	Mounting bracket or tripod adapter available ¹	Mounting bracket or tripod adapter available ¹

	Mag-03MSS
Operating temperature range	-10°C to +50°C
Environmental protection	IP68 (submersible to 2000m)
Dimensions (mm)	30 x 30 x 208
Weight	185g
Enclosure material	Polyacetal
Connector	Impulse IE XSJ-7-BCR
Mating connector	Impulse IE XSJ-7-CCP ⁴
Mounting	3 x M3 clearance holes

See the Mag-03 product page at www.bartington.com/mag-03 for sensor outline drawings of these enclosure types.

Footnotes to sensor specifications

1. Bracket or Tripod Adaptor is only suitable for the electronics enclosure.
2. Flying leads and independent elements wires are susceptible to EM interference and should be screened wherever possible.
3. Standard length if not specified in order.
4. Modified to be non-magnetic.

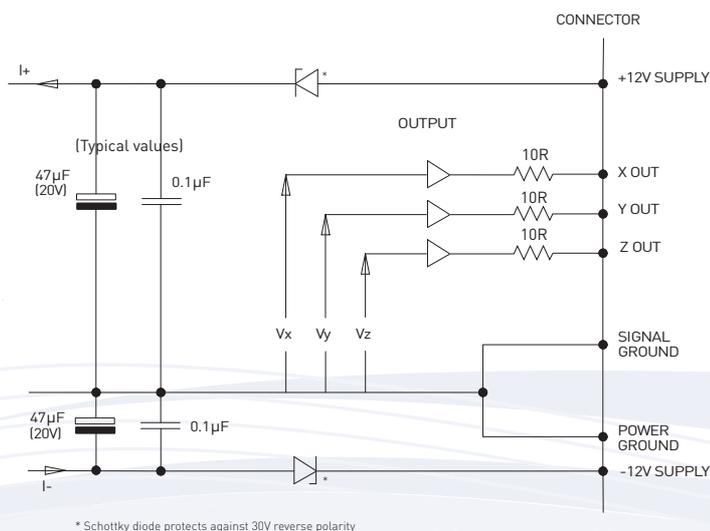
Mag-03 Three Axis Magnetic Field Sensors

Electrical

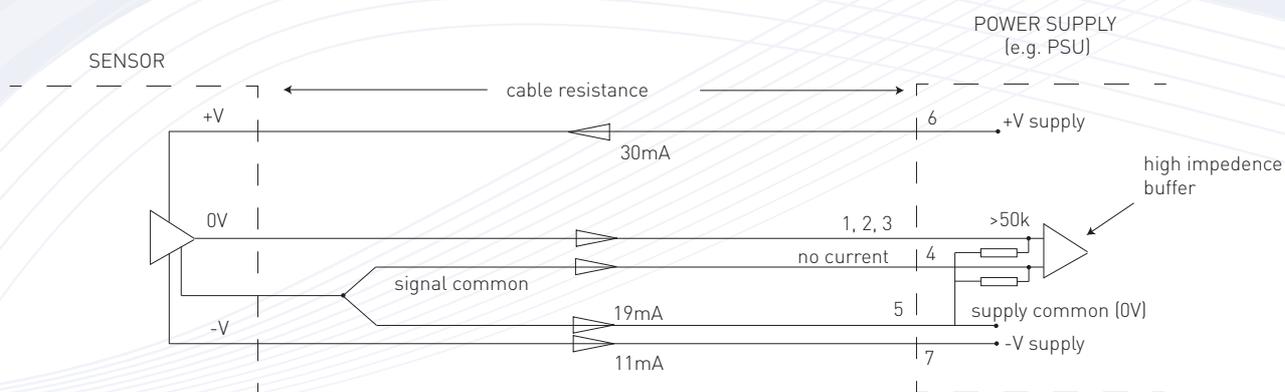
Supply voltage	$\pm 12\text{V}$ to $\pm 17\text{V}$
Current consumption	+30mA, -10mA (+1.4mA per 100 μT for each axis)
Power supply rejection ratio	5 $\mu\text{V/V}$ (-106dB)
Analogue output	$\pm 10\text{V}$ ($\pm 12\text{V}$ supply) swings to within 0.5V of supply voltage (unbalanced, single ended ref. 0V)*
Output impedance	10 Ω

* In the temperature range -40°C to $+70^{\circ}\text{C}$, and with an external load of 10k Ω , the maximum output voltage will be less than the supply voltage by the value given in the table below. All parameters, other than the output voltage range, remain unaffected for supply voltage (V_s) changes in the range from ± 8 to $\pm 15\text{V}$.

Nominal range (μT)	100	250	500	1000
Output swing	$V_s - 0.5$	$V_s - 0.7$	$V_s - 0.8$	$V_s - 1.0$



Mag-03 interface schematic



Mag-03 electrical schematic

Mating Connectors

With the exception of the Mag-03MSS, non-magnetic mating connectors are provided free of charge for all Mag-03 sensors purchased without cables.

Cables

Cables can be supplied for most Mag-03 sensor versions. The standard cable length is 5m. Other lengths up to 600m can be supplied on request. All cables terminate with a Hirose RM15TPD10S, suitable for connection to Bartington Instruments' range of data acquisition and power supply units.

Mag-03MS, Mag-03MSES, Mag-03IE, Mag-03MC, Mag-03MCES, Mag-03MCT, Mag-03MCTP	
Conductors	7/0.2 PVC insulated conductors, overall braided screen and PVC sheath
Type no.	7-2-8C Black to Def Stan 61-12, part 4
Conductor resistance	0.092Ω/m
Capacitance	100pF/m core to core 170pF/m core to screen

Mag-03MSS submersible cable	
Conductors	3 pairs individually screened, with polyurethane sheath
Conductor resistance	0.034Ω/m
Weight	0.10kg/m (in air) / 0.026kg/m (in sea water)
Cable bending radius	77mm

Cable connections

SIGNAL	SUPPLY END	SENSOR END					
		Mag-03MS	Mag-03MC Mag-03IE Mag-03IEHV Mag-03MCTP Mag-03MCT	Mag-03MCES Mag-03MSES	Mag-03MSS	Mag-03IEv1	Mag-03IEv2
X out	1	6	1	A	1	1	5
Y out	2	8	2	B	2	2	6
Z out	3	5	3	C	3	3	7
Signal/Power ground	4	4	4	D	4	6,7,8	17,18,19
Signal/Power ground	5	3	5	E	5	9	12
+12V supply	6	1	6	F	6	4	11
-12V supply	7	2	7	G	7	5	13
NC	8,9,10	7,9	8,9,10		8,9,10		1,2,3,4,8,9,10,14,15

For details of cable colours see the figure showing the relevant cable on the Bartington Instruments website.

Compatibility

The Mag-03 range is compatible with the following data acquisition and power supply units from Bartington Instruments:

- PSU1 Power Supply Unit
- Magmeter and Magmeter-2 Power Supply and Display Units
- Spectramag-6 Data Acquisition Unit
- SCU1 Signal Conditioning Unit
- Mag-03DAM Data Acquisition Module
- Decaport Analogue Interface Module
- DAS1 Data Acquisition System
- DecaPSU Power Supply Unit

Mounting Accessories

A range of mounting accessories are available:

Specification	
Mag-BR	Mounting bracket for use with the cylindrical range of Mag-03 sensors ¹
Mag-T	Tripod
Mag-TA	Tripod adaptor (not compatible with Mag-03MSS) ²
Mag-LP	Levelling platform for use with the Mag-TA, Mag-T and Mag-MR
Mag-MR	Mounting rack for the installation of Mag-LP and Mag-03 sensors, available in lengths of 1 metre and multiples

1. Bracket is manufactured from reinforced epoxy resin and supplied complete with nylon mounting screws.

2. The Mag-03MSS has a square section pressure housing with three mounting holes, 4 mm in diameter, drilled through the body and counterbored for cheesehead screws. Screws are not provided due to the variable nature of the environmental service conditions which may be encountered.

Sensor	Appropriate support	Notes
Mag-03MC Mag-03MCES Mag-03MCT Mag-03MCFL	Mag-BR mounting bracket. Mag-TA tripod adaptor	Bracket clamps around the cylindrical enclosure.
Mag-03IE	Mag-BR mounting bracket. Mag-TA tripod adaptor	Bracket clamps around the body of the sensor, not the sensor heads.
Mag-03MS Mag-03MSES	Mag-TA tripod adaptor	Sensors have threaded holes tapped in the base which is also the datum face. The sensors can be mounted on any flat, non-magnetic surface, including the top of the mounting bracket, using the two brass screws supplied. A thin gasket or a suitable sealant should be used to seal the base of the units against water penetration.
Models not listed	Customer must provide mounting support	

Calibration Units

These units provide a fast and convenient facility to test the accuracy and functionality of a Mag-03 sensor. They consist of a battery powered Helmholtz coil generating an alternating magnetic field, with guides to align each of the sensor axes in turn.

Note that these units are not intended as a full calibration facility. It is recommended that sensors are returned to Bartington Instruments for full recalibration.



Specification

Sinewave magnitude	50 μ T p-p (17.5 μ T rms) \pm 1% (distortion 5% typical)
Frequency	190Hz \pm 2%
Environmental	IP60 not suitable for use in wet conditions
Dimensions (mm)	\varnothing 100 x 125 length
Weight	990g
Enclosure material	Polyethylene terephthalate
Battery	PP3 9V alkaline or lithium dioxide (20 hours' continuous use) with tri-colour LED indicator

Ordering code:	Suitable for use with:
Mag-03MS-CU	Mag-03MS, Mag-03MSES
Mag-03MSS-CU	Mag-03MSS
Mag-03MC-CU	Mag-03MC, Mag-03MCES, Mag-03MCFL, Mag-03MCT, Mag-03MCUP, Mag-03MCTP
Mag-03IE-CU	Mag-03IE



Bartington[®]
Instruments

Bartington Instruments Limited,
5, 10 & 11 Thorney Leys Business Park,
Witney, Oxford, OX28 4GE, England.

T: +44 (0)1993 706565
F: +44 (0)1993 774813
E: sales@bartington.com

The specifications of the products described in this brochure are subject to
change without prior notice.
Bartington[®] is a registered trademark of Bartington Instruments Ltd.

www.bartington.com

Annexe C

Comprendre *gridfit*

UNDERSTANDING GRIDFIT

John R. D'Errico

Email: woodchips@rochester.rr.com

December 15, 2006

1 Introduction

GRIDFIT is a surface modeling tool, fitting a surface of the form $z(x, y)$ to scattered (or regular) data. As it is not an interpolant, it allows the existence of replicates in your data with no problems. What do I mean by an "interpolant"? An interpolant is a code that is designed to always exactly predict all supplied data. GRIDDATA and INTERP1 are examples of interpolants. GRIDFIT is more accurately described as an approximant. It produces a surface which represents the behavior of the supplied data as closely as possible, allowing for noise in the data and for replicate data.

A nice feature of GRIDFIT is its ability to smoothly extrapolate beyond the convex hull of your data, something that GRIDDATA cannot do.¹ Finally, GRIDFIT does its extrapolation in a well behaved manner, unlike how polynomial models (for example) might behave in extrapolation.

GRIDFIT also allows you to build a gridded surface directly from your data, rather than interpolating a linear approximation to a surface from a delaunay triangulation.

This document describes the ideas behind GRIDFIT.

2 The mechanical and philosophical underpinnings of GRIDFIT

How does GRIDFIT work? Imagine a thin, flexible plate, attached to your data points by elastic bands. Each of these elastic bands draws the plate towards its corresponding data point, stretching only in the z direction. If your data points were to fall on a simple planar surface,

$$z(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y \tag{1}$$

¹except by the slow, memory intensive 'v4' method

then the result will be a least squares plane. This works because the potential energy stored in a elastic band² will be proportional to the square of its extension.

Now imagine that the data points do not fall on a plane, but arise from some curved surface $z(x,y)$. While the plate itself is flexible, I've allowed it some finite and non-zero bending rigidity that the user can control. The bands connecting the plate to our data points will pull the plate into a curved shape, while the bending rigidity of the plate resists deformation. The relative stiffness of the plate, as compared to the strength of the elastic bands will cause some tradeoff between fitting the data as well as possible and a smooth overall surface. It is this plate stiffness that allows GRIDFIT to smoothly extrapolate beyond the data itself. Of course, extrapolation beyond the data will be well behaved, since the plate will tend to become locally planar wherever there is no data to deform it.

The tradeoff between stiffness of the plate and the effective spring constant of the bands connecting the plate to the data allows the user to choose anything between the extremes of a purely planar fit, to a crinkly thing that can follow the bumps and hollows of noisy data.

3 The methodology of GRIDFIT

First, lets look at how GRIDFIT predicts a value at any location. Since the GRIDFIT surface is defined by values at a set of nodes forming a rectangular lattice, any data point must lie in one of these rectangular cells of the lattice. (One requirement of GRIDFIT is that the boundaries of its lattice must form a bounding box for all of the data supplied in the (x,y) plane.)

Given a point inside a single rectangular cell of the lattice, there are three methods supplied in GRIDFIT to impute a value at that point. They are:

- Nearest neighbor interpolation
- Triangle (linear) interpolation
- Bilinear (tensor product linear) interpolation

These methods were chosen to be simple to generate, as well as because they are very "local" methods. They require no more than a few local values from the grid to predict the value at each point. This local nature makes the sparse linear least squares problem as efficient as possible, by keeping it maximally sparse.

If we think of the surface that will result from GRIDFIT as essentially a low order spline, it is easy to visualize the idea that interpolation at any

²perfect, linearly elastic

point inside the grid is just a linear combination of the values at the grid nodes in the locality of the given point. Thus, we can write the interpolation problem in general as a linear algebra problem

$$A\mathbf{x} = \mathbf{y} \tag{2}$$

where the vector \mathbf{x} is of length $nx \cdot ny$ (nx is the number of nodes in the \mathbf{x} direction, and ny is the number of grid nodes in the \mathbf{y} direction.) Thus A has n rows, corresponding to each data point supplied by the user, and $nx \cdot ny$ columns.

It will not be atypical to expect that there will be more columns than rows in this "regression" problem. For example, a user with 100 data points might choose to build a gridded surface which has 100×100 nodes. The resulting regression problem will be massively underdetermined. As such, standard regression techniques, involving a solution like $\mathbf{x} = A \backslash \mathbf{y}$ or $\mathbf{x} = \text{pinv}(A) * \mathbf{y}$, will be inappropriate.

The approach that GRIDFIT takes, with its plate-like metaphor, is to solve a regularized problem. At every node of the surface, GRIDFIT³ attempts to force the (first) partial derivatives of the surface in neighboring cells to be equal. In effect, this results in a second set of linear equations of the form

$$B\mathbf{x} = \mathbf{0} \tag{3}$$

where the derivatives are approximated using finite differences of the surface at neighboring nodes.

The main alternative regularization method in GRIDFIT is the 'laplacian' method. It attempts to force the sum of second partial derivatives to zero. This is actually closely related to the gradient method, but with a subtly significant difference. Either method will work nicely. (The 'springs' regularizer for GRIDFIT is a flawed one, at least in my humble opinion. I'd generally recommend not using it without care. I've left it in the code because it has interesting properties in extrapolation.)

The result of any of these regularizers is a system of the form $B\mathbf{x} = \mathbf{0}$. Coupled with the interpolation system, $A\mathbf{x} = \mathbf{y}$, we solve them in combination using a simple trick. First, I scale A and B so that each matrix has a unit 1-norm. This helps to eliminate scaling problems with the derivatives. Then I solve for the vector \mathbf{x} such that

$$\|(A\mathbf{x} - \mathbf{y})\|^2 + \lambda \|B\mathbf{x}\|^2 \tag{4}$$

is minimized. Note that the parameter λ , nominally 1 as a default in GRIDFIT, allows the user to control the relative plate "stiffness". As λ approaches zero, the plate becomes as flexible as possible. Stiffer plates are modeled by larger values, $\lambda > 1$.

³using its default regularization method of 'gradient'

4 Tricks with tiles

What can you do when a GRIDFIT problem is simply too large even for the sparse matrix abilities of MATLAB? This is where the tiling abilities of GRIDFIT become valuable. What do I mean by tiling? An example might be appropriate.

```
>> nodes = linspace(0,1,100);
>> tic,...
zg=gridfit(rand(100,1),rand(100,1),rand(100,1),nodes,nodes);...
toc
Elapsed time is 5.814102 seconds.
>>
>> nodes = linspace(0,1,200);
>> tic,...
zg=gridfit(rand(100,1),rand(100,1),rand(100,1),nodes,nodes);...
toc
Elapsed time is 27.118945 seconds.
```

To solve for a 100×100 grid, GRIDFIT must solve for 10000 unknown parameters using sparse linear algebra. A 200×200 grid is nominally 4 times as large, and it took my computer a bit more than $4\times$ as long to solve. However, a 2000×2000 grid will probably take much more than 400 times as long to solve as a 100×100 grid. It will likely take very much longer, if it runs at all without exceeding the memory limits, due to the much slower access times for virtual memory. For example, my computer took 1020 seconds to solve a 500×500 problem.

```
>> nodes = linspace(0,1,500);
>> tic,...
zg=gridfit(rand(100,1),rand(100,1),rand(100,1),nodes,nodes);...
toc
Elapsed time is 1020.657834 seconds.
```

A trick that can work, IF you have enough data to adequately populate each tile, is to break down the domain of a large grid into smaller chunks, each of which can be quickly populated by GRIDFIT. Then GRIDFIT composes each chunk into the whole surface. To smooth out any artifacts at the edges of each tile, GRIDFIT allows the tiles some fractional overlap, interpolating between them in the overlapped region. Thus the tiled solution below was accomplished with essentially no dips into virtual memory, so it took far less time to generate.

```
>> nodes = linspace(0,1,500);
>> tic,...
```

```

zg=gridfit(rand(100,1),rand(100,1),rand(100,1),nodes,nodes,...
'tilesize',200,'overlap',0.2);...
toc
Elapsed time is 211.946853 seconds.

```

Note: these random surfaces were generated purely to show speed of estimation. They are of course purely garbage. Also, only 100 data points may well be inadequate to estimate a tiled surface. GRIDFIT is not strongly dependent on the number of data points for its speed, so that number did not have an impact on the speed of estimation.

A picture:

```

% Users of gridfit who have really huge problems now have
% an option. I'll generate a large amount of data,
% and hope to model a fairly large grid - 800 x 800. This
% would normally require gridfit to solve a system of
% equations with 640,000 unknowns. It would probably be too
% large of a problem for my computer, were I to use gridfit
% on the full problem. Gridfit allows you to break the problem
% into smaller tiles if you choose. In this case each tile
% is 120x120, with a 25% (30 element) overlap between tiles.

% Relax, this demo may take a couple of minutes to run!!!!

n = 100000;
x = rand(n,1);
y = rand(n,1);
z = x+y+sin((x.^2+y.^2)*10);

xnodes = 0:.00125:1;
ynodes = xnodes;

[zg,xg,yg] = gridfit(x,y,z,xnodes,ynodes,'tilesize',...
120,'overlap',0.25);

surf(xg,yg,zg)
shading interp
colormap(jet(256))
camlight right
lighting phong
title 'Tiled gridfit'

```

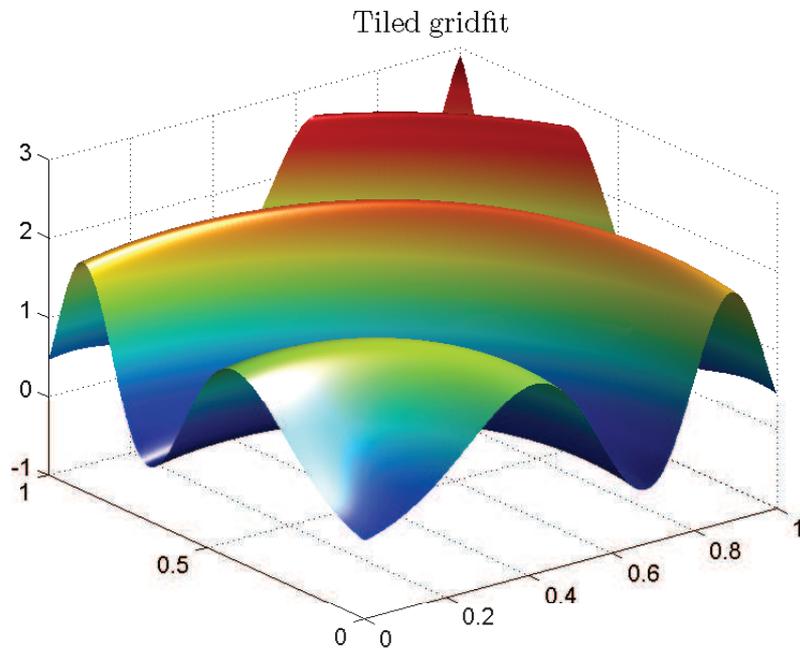


Figure 1: An Example

Annexe D

Gavazzi *et al.*

Article soumis à *Archaeological Prospection*.

1 **On the use of fluxgate 3-axis magnetometers in archaeology: a multi-sensor device**
2 **and associated potential field operators for large scale investigations. Application**
3 **on the site of Qasr ‘Allam in the western desert of Egypt.**

4 Bruno Gavazzi (corresponding author)^{a, b} (bgavazzi@unistra.fr ; Phone +33368850365 ;
5 mobile +33607639713), Rozan Alkhatib-Alkontar^a, Marc Munsch^a, Frédéric Colin^{b, c},
6 Catherine Duvette^b

7 ^aUMR 7516, Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS), École et Observatoire
8 des Sciences de la Terre (EOST), University of Strasbourg, Bâtiment Blessig, 1 rue
9 Blessig, F-67084 Strasbourg cedex, France.

10 ^bUMR 7044, Archéologie et histoire ancienne : Méditerranée – Europe (Archimède),
11 Maison Interuniversitaire des Sciences de l'Homme – Alsace (MISHA), University of
12 Strasbourg, 5 allée du Général Rouvillois, F-67083 Strasbourg cedex, France.

13 ^cInstitut Français d'Archéologie Orientale (IFAO), 37 rue al-Cheikh Ali Youssef, B.P.
14 11562 Qasr al-Aīny 11441 Cairo, Egypt.

15 **Sponsor:** The study was sponsored by the Initiatives d'Excellence (IdEx, Programme
16 Investissements d'Avenir) of the University of Strasbourg.

17 **Abstract**

18 Fluxgate 3-axis magnetometers are very seldom used in archaeological context due to
19 their lack of precision. They offer nonetheless light weight, low power consumption and
20 the ability of compensation of the magnetization of the prospecting device. The study
21 proposes to use calibration and compensation processes developed for space research
22 and aerial measurement to build a multi-sensors and georeferenced device to assess
23 deep and shallow objects for a large scale archaeological investigations in Qasr ‘Allam,
24 in a context of heavy sedimentary coverage and uneven topography. The use of the
25 device on the site in combination with potential field operators such as the double
26 reduction to the pole and the vertical derivative reveal a vast irrigation system as well as
27 a large cultic facility. A comparison with gradiometry results shows a resolution at least
28 as good for shallow sources as with gradiometers. The precise positioning allowed the
29 realisation of targeted excavations which validated the geophysical interpretations and
30 offered new archaeological information. These discoveries gave enough proof to the
31 local authorities to enlarge the protection of the site against the threatening progression
32 of agricultural fields.

33 **Keywords:** Archaeological prospection, Magnetometry, Multi-sensors,
34 Compensation, Double Reduction to the pole, Vertical derivatives.

35 **Introduction**

36 Situated in the Western Desert of Egypt, the oasis of Bahariya (Figure 1) is inhabited
37 since Prehistory (Svoboda, 2006; 2013). In the area, the main phases of the ancient
38 Egyptian civilization can be observed, though they are less well documented than in the
39 Nile valley, as only a few scholars have studied this region, due to the difficulties of
40 access before the construction of a road in the middle of the 20th century. However, the
41 number of investigation has increased since the end of the nineties and it revealed the
42 high archaeological potential of this area for studying a locally under-recognized period,
43 from the Third Intermediate Period until the Roman times, i.e. from the 9th century B.C.
44 to the 3rd century A.D. (Colin, 2013a, pp. 151–152). In this paper, the focus is put on the
45 site of Qasr ‘Allam (Figure 1), where strong technical challenges to locate and study the
46 archaeological remains of a historically significant dwelling arise from both erasure by
47 heavy sedimentary processes and the threat of rapid destruction by recent increases in
48 farming development.

49 **The site of Qasr ‘Allam**

50 Before any archaeological study, the site of Qasr ‘Allam was known mostly for a
51 rectangular structure emerging from the sand which was interpreted by the inhabitant as
52 an Arabic fort (Labrique and Colin, 2003, p.159). Since then, more than ten years of
53 excavation revealed facilities buried within sand and mud and composed of mudbrick
54 buildings of different natures, such as housings, storerooms and workshops (Figure 2,
55 A-B-C). These structures were interpreted as part of a wide religious estate, the
56 “Domain of Amun” according to stamped potteries found in rubbish deposits of the
57 dwellings, of which two periods of occupation can be identified in the course of the 9th
58 to the 7th centuries B.C (Colin, 2011, pp. 57–68). All around the dwelling, a complex
59 network of fossilized irrigation structures can be found through the traces of wells as
60 well as open and underground channels. Nowadays the landscape is arid and covered by
61 sand, and most of these structures are partially or totally filled and visible mainly
62 through the rubbles from their construction and maintenance (Figure 2, A-D-E-F).

63 These discoveries might indicate that the site could be a well preserved example of a
64 complete cultic facility with three main components: a cultic core, associated domestic
65 buildings and its surrounding agricultural domain, of which most parts are still buried

66 within the ground. The structural organization of the excavated buildings suggests
67 indeed that they were only an annex in the periphery of a much larger and central
68 religious facility (Colin, 2011, pp. 65–66; Colin and Duvette, 2012, pp. 161–162).
69 According to this hypothesis, the direction of the access ramp of a cellular foundation
70 platform (Figure 2, A-B), whose typology is well known in the Nile valley (Spencer,
71 1979; Traunecker, 1987; Leclère, 2008; Malecka-Drozd, 2014), would indicate that the
72 presumed core is located westwards, where lies a sand dune of a thickness about a few
73 metres and where no archaeological traces are visible on the surface.

74 However, this hypothesis suffers from two uncertainties: 1- The lack of traces on the
75 surface of the core of the complex. 2- The lack of information on the spatial and
76 chronological links between the buildings and the irrigation system.

77 Answers to these problems could be gained from a geophysical imaging of the sub-
78 surface. The surveying strategy should then take into account strong constraints: the
79 area is highly threatened from the west by the agricultural development, increasing
80 every year. Therewith, the whole dune shows an uneven topography scattered with dried
81 halfa grass and bushes reaching a height up to 0.8 m. Thus, the prospection of the area
82 must be fast and adapted to the roughness of the terrain.

83 **Choice of the geophysical method**

84 In such a context, the most appropriate solution seems to be the use of geomagnetic
85 methods, for the same reasons that make them so popular for archaeological purposes
86 (Linford, 2006; Gaffney, 2008): -1- the rapidity of measurement and lightness of the
87 sensors allow to map large surfaces with a high density of data, -2- the anthropic traces
88 show usually a strong contrast of magnetization with their surroundings. In addition, a
89 first prospection using vector gradiometer (Geoscan FM256) was conducted between
90 the sand dune and the platform in 2007 and 2010 by Tomasz Herbich. It revealed
91 irrigation structures as well as walls and foundation trenches (Colin, 2007; Colin, 2010;
92 Herbich, 2011), thus giving evidence of a contrast of magnetization sufficient enough to
93 identify the archaeological remains. However, the study also revealed some limitations
94 to cover the sand dune: the topography and vegetation make the implementation of a
95 grid and the placement of the captors under 0.8 m above the ground highly difficult
96 without an intense preparation of the field. Moreover, one of the properties of
97 gradiometers is to enhance short wavelength and smooth large wavelength variations of

98 the magnetic field, which make them extremely sensitive to shallow objects but quite
99 limited to identify deeper sources or lower contrasts (Gaffney, 2008, p. 318) as it is the
100 case here. This paper proposes to overcome these limitations by adapting the
101 measurement of the total magnetic field with vector fluxgate magnetometers, usually
102 used in space research or mining exploration (Nabighian *et al.*, 2005), and more recently
103 for the detection of unexploded ordnances (Munsch *et al.*, 2007), to archaeological
104 surveys.

105 **Method**

106 *Device*

107 The core of the developed method lies in the measurement of the intensity of the
108 magnetic field with fluxgate magnetometers. Such magnetometers (Figure 3, A) have
109 the advantage of being light (80g) and consuming low energy (< 1W). Their three
110 orthogonal sensors allow the measurement of the three components of the magnetic
111 field at rate up to more than 1000 Hz (Primdahl, 1979), from which the total field can
112 easily be calculated. The device developed for this study (Figure 3, C) is built around a
113 custom electronics (Figure 3, B). It powers the rest of the instrument, digitizes and
114 stores the data of 1 to 8 magnetometers as well as 1 to 2 global navigation satellite
115 system (GNSS) antennas. The electronics is mounted on a backpack and 4
116 magnetometers are placed 0.5 m apart from each other in front of the operator, one
117 metre above the ground. A GNSS antenna is placed at the top for the navigation. Both
118 navigation and magnetic data are displayed in real time through a head mounted display
119 (HMD). The device weighs less than 15 kg and can be operated by a single person who
120 follows parallel routes set every 2m and displayed in the HMD. Thus, georeferenced
121 magnetic profiles are acquired every 0.5 m without any preparation on the field. In Qasr
122 ‘Allam, 5000 m² to 12000 m² were acquired per hour of measurement.

123 *Calibration and compensation*

124 The great disadvantage of the fluxgate magnetometers is that it is a relative device
125 which requires a precise calibration before each session of measurements to correct its
126 errors of sensitivity, offset and angle. This problem is well known and various
127 techniques of calibration have been developed. In this study the calibration is done
128 using a process developed initially for space research (Olsen *et al.*, 2003). It consists in

129 the rotation of the magnetometers (or the whole device) in all direction around a fixed
130 point where the magnetic field can be considered steady. The registered variations are
131 therefore only due to the different kinds of errors which can then be minimized using a
132 least squares method. The great advantage of the process is that it also compensates the
133 remnant and induced magnetization of the device itself (Munschy *et al.*, 2007). This
134 makes the fluxgate the only magnetometer capable of such compensation, allowing
135 compact multi-sensor devices as well as motorized measurements. A typical result of
136 the effect of the calibration and compensation process on a magnetometer is shown in
137 Figure 4. The standard deviation of the variation of the measurement of a fixed point is
138 reduced from around 100 nT to less than 0.5 nT.

139 *Time-dependant variations*

140 Another issue with the measurement of the total magnetic field is the correction of
141 the time-dependant variations which may be caused by extra-terrestrial sources or
142 anthropic activities. Additionally, fluxgate magnetometers are not absolute and subject
143 to drift with the change of temperature (0.1 to 0.5 nT/°C according to the manufacturer).
144 In Qasr ‘Allam at the time scale of the acquisition, i.e. one hour sessions, the effects of
145 extra-terrestrial sources and variations of temperature on each magnetometer can
146 usually be considered linear for each magnetometer (Figure 5), and are therefore easily
147 corrected by measuring the same point at the beginning and the end of each session. In
148 an environment affected by homogeneous but not linear temporal variations, as it is
149 often the case in urban areas, corrections can be made by using a magnetometer
150 installed at a fixed point during the measurements, thus recording only the time
151 dependant part of the signal.

152 *Data processing*

153 The measurement gives the 3 components of the total magnetic field, from which the
154 total intensity is easily calculated. In archaeology the interest is in subtle spatial
155 variations: the anomaly of the intensity of the total magnetic field (AITMF), that is
156 defined as the difference between the intensity of the measured magnetic field and the
157 regional field (Blakely, 1995). The latest is computed using the International
158 Geomagnetic Reference Field (Finlay *et al.*, 2010). The AITMF can then be displayed
159 either as profiles or as maps after a gridding operation, with a node distance usually set

160 as the half of the distance between each magnetometer, i.e. 0.25 m. After this
161 calculation, the residual errors can lead to the appearance of a levelling effect between
162 profiles (Fedi and Florio, 2003). To solve this problem the differences between the
163 values at magnetic profiles (in-lines) and traverses (tie-lines) are measured. Then, a
164 constant to apply to each profile is calculated by a linear inversion to minimize the
165 differences at the crossing points.

166 **Results**

167 The acquisition took place April and May 2012. In 25 days, more than 800 km of
168 georeferenced magnetic profiles were recorded over an area about 340,000 m² (Figure
169 6).

170 *Maps of magnetic anomalies*

171 Usually, magnetic anomalies are represented through linear colour maps. Those
172 consist in attributing a colour or shade to each node of the grid according to its value
173 using a linear scale, as shown in Figure 7. Unfortunately, such a representation is often
174 not sufficient to show accurately all the anomalies of a site, as they can range from a
175 few to hundreds of nano-Tesla. A common solution to this problem is to display
176 multiple maps with different scales to understand the anomalies from the largest to the
177 smallest. Such a process might be time consuming and is not the most practical, as
178 several maps have to be observed at the same time. To overcome this problem, we
179 introduce another approach, the equi-populated mapping. An equi-populated map
180 consists in attributing a shade (or colour) to each node using a non-linear scale in such a
181 way that all the shades are evenly distributed on the map. Thus, both small and strong
182 magnetic anomalies can be represented on a unique map, as shown in Figure 8.

183 From both representations (Figure 7-8), different kind of anomalies can be observed
184 on the site. Depending on their wavelength and shape, they can be sorted as follow.

- 185 - **Dipolar anomalies:** the strongest one in the west is due to a metallic pole; the
186 others are due to pieces of metal which are scattered everywhere on the site,
187 showing no particular distribution.
- 188 - **Short wavelength lineation:** about 1 m and less. They are the most common
189 anomalies and can be sorted in different subgroups. In the southern part, a high
190 concentration of curved lines following roughly N-S and E-W orientations is

191 present. A similar pattern can be seen in the northern part, though in much
192 smaller quantities. In the central part, the lines are straighter and follow an
193 orientation similar to the one of the large wavelength lineation surrounding
194 them.

195 - **Large wavelength lineation:** about 10 m. They approximately draw two
196 rectangles of 150 x 100 and 125 x 100 m in the central part of the map. Their
197 orientation is of a few degrees east.

198 - **North-south gradient:** the magnetic anomaly field decrease of about 20 nT
199 from north to south. This gradient cannot be explained by the regional magnetic
200 field as the International Geomagnetic Reference Field gives an increase of 3.8
201 nT from north to south. Thus, it is likely that such a gradient is due to a deep
202 local variation of the underlying geology.

203 These anomalies reveal the presence of different kind of heterogeneities within the
204 ground. Unfortunately, the shape, amplitude and position of an anomaly (as well as the
205 gradient) depend on multiple factor such as the shape, the orientation, the position and
206 magnetization of the source as well as the orientation of the regional magnetic field. To
207 decipher these anomalies, powerful interpretation tools can be found in potential field
208 theory.

209 *Potential field operators*

210 In any kind of magnetometry, the horizontal position of the sources is situated
211 somewhere in between the positive and negative poles of a skewed anomaly. When the
212 wavelength is shorter than the size of the object, as it is often the case for very shallow
213 objects, this is not a problem. Otherwise, as it is the case in this study, the error can
214 reach up to a few metres, which is not acceptable to organize excavations. Fortunately,
215 the exact position of the remains can be obtained by the use of a potential field operator
216 known as the double reduction to the pole (DRP). The DRP consists in the calculation
217 of the signal when both the magnetization and regional field are set vertical. Thus the
218 anomalies become symmetrical with their maxima above their sources (Baranov, 1957).
219 In the spectral domain, the operation is easily done by multiplying the spectrum of the
220 anomaly by

$$\left[\frac{i\sqrt{u^2 + v^2}}{au + bv + ic\sqrt{u^2 + v^2}} \right]^2, \quad (1)$$

221 where u and v are the wavelengths associated with x and y directions, $i^2 = -1$, and
 222 (a,b,c) the components of the unit vector in the direction of the regional magnetic field
 223 (Bhattacharyya, 1965). The orientation of the regional field is given by the IGRF while
 224 the orientation of magnetization is either set as the same as the regional field when the
 225 ratio remnant/induced magnetization is near zero or obtained through successive
 226 iterations until the signal become symmetrical. In Qasr 'Allam, as the buildings are
 227 made in mudbricks, the orientation of magnetization was set as the same as the one of
 228 the regional field. The anomalies become symmetrical (Figure 9), the hypothesis is thus
 229 confirmed. It must be noted that a simple reduction to the pole (only one vector set
 230 vertical) does not give the position of the source (Figure 9). The calculated DRP map
 231 gives therefore the position of sources visible or not on the surface (Figure 10). The
 232 archaeological interpretation stays difficult due to the presence of a very large
 233 wavelength anomaly most probably due to the geology. An easy way to enhance the
 234 shortest wavelength while smoothing the largest ones is the use of the vertical
 235 derivative. The operation is straightforward in the spectral domain and corresponds to
 236 the multiplication of the spectrum of the map by

$$\left(\sqrt{u^2 + v^2} \right)^n, \quad (2)$$

237 where u and v are the wavelengths associated with x and y directions and n is the
 238 order of derivation. On the obtained map (Figure 11), it can be observed that the
 239 different lines are indeed enhanced and, most importantly, new lineation appear,
 240 especially in the central area. It must be noted that the results correspond
 241 mathematically to the gradient of the magnetic anomaly after double reduction to the
 242 pole.

243 *Comparison with gradiometry*

244 To assess the quality of the data for archaeological interpretation compared to
 245 gradiometry, the area surveyed by Tomasz Herbich with a fluxgate gradiometer
 246 (Geoscan FM256) was also covered with the device developed in this study. The
 247 comparison of the results (Figure 12) shows that the proposed method reveals at least as

248 many information as a vectorial gradiometer, even though the magnetometers are placed
249 further from the ground (1 m).

250 **Discussion**

251 *Interpretation of magnetic anomalies*

252 The different results give important information on the sources of the magnetic
253 anomalies. The different lineation can be interpreted as highly probable archaeological
254 remains and divided into three categories: large wavelengths, straight and non-straight
255 short wavelengths. The non-straight lines of short wavelengths follow the same rough
256 orientation pattern and shape as the irrigation structures visible on the surface, with
257 some of them even continuing directly the traces observed on the surface. They are also
258 mostly connected to an area of visible wells in the south eastern part of the site (Figure
259 2-6). This strongly suggests that those anomalies can be interpreted as irrigation
260 structures, present not only under the sand dune, but also within the harder ground in the
261 whole area (Figure 13). A targeted excavation of such a structure within the sand dune,
262 which started in 2012, revealed indeed open irrigation channels. The filling sediments
263 of one segment contained artefacts (potteries, terracotta figurines) of a well-attested
264 type, according to the local typology of the 8th or the 7th century B.C. (Colin and
265 Duvette, 2012, p. 164). This information validates the hypothesis that at least one part
266 of the irrigation network was contemporary to the cultic complex and that these farming
267 devices most probably belonged to the religious estate.

268 The other lines can be interpreted differently. They are situated in front of the access
269 ramp of the platform, where the rest of a religious facility can be expected. They show
270 angular and organised shapes, and display an orientation similar to the one of the
271 already excavated constructions. It can therefore be stated that they most likely
272 correspond to ancient buildings, thus enlarging the surface of the facility from 40 000
273 m² to 150 000 m² (Figure 13). The difference of wavelength can be explained as
274 different depths of burial, either due to the variability of the post-abandonment
275 sedimentary deposits, to different sizes of structures, or to successive archaeological
276 periods. Two targeted excavation, which started in 2013 and 2014 and are still in
277 progress, revealed indeed the presence of cultic buildings at different depth
278 corresponding to different occupation at least from the 8th or the 7th century B.C. to the
279 2nd century A.D. and affected by an environmental change (Colin, 2013b; Colin *et al.*,

280 2014): the stratigraphy of the tested areas revealed that the sedimentary processes
281 followed two successive patterns. The ruins of the last occupation period (Roman times)
282 are mainly covered by aeolian sand in an arid context, but the remains of the former
283 periods (from Third Intermediate Period until Late Period or later) are filled with
284 alluvial earthen sediments, in a seemingly more humid context.

285 *The 3-axis fluxgate magnetometer total field approach*

286 In addition to the interpretative results, the study reveals the potential of the use of 3-
287 axis fluxgate magnetometers for large scale archaeological surveys. The lightness of the
288 magnetometers and the compensation ability allow the construction of a compact multi-
289 sensors device with which a unique technician can acquire at least four simultaneous
290 georeferenced magnetic data without any preliminary preparation of the site. The
291 position of the magnetometers at 1 m above the ground allow to cover areas with more
292 vegetation or a more uneven topography that with a gradiometer in the advised
293 configuration of the probes (the lower one being placed usually between 0.2 and 0.3 m
294 above the ground). Thus, the proposed approach proved to be capable to survey 5000 to
295 12000 m² per hour with a 0.5 m spacing and reveal at least as many information on
296 archaeological remains as a gradiometer through the use of the vertical derivative of the
297 signal (Figure 12). It must also be noted that the application of the double reduction to
298 the pole gives theoretically the exact horizontal position of the sources, unlike a single
299 reduction which leads to a residual skewness. If the difference or even the use of a
300 reduction can be negligible for very shallow sources, it is not the case with deeper
301 sources, as shown in Figure 9 and the comparison between Figure 8 and 10.

302 **Conclusion**

303 The study both validates the application of an innovative approach to magnetic
304 prospections in archaeology and reveals important information on the site of Qasr
305 ‘Allam.

306 The use 3-axis fluxgate magnetometers and associated potential field operators
307 proved to be efficient to reveal information on both deep and shallow archaeological
308 sources at a large and rapid scale. The good results obtained in Qasr ‘Allam offer two
309 prospects for further development: 1- doubling the speed of acquisition by doubling the

310 number of magnetometers; 2- using the compensation ability to develop a device with
311 centimetres spacing for high precision small scale surveys.

312 The geophysical survey strengthens the hypothesis of the archaeologists. It locates
313 remains of large scale buildings positioned in the expected area, whose general plan and
314 direction are consistent with the hypothesis of a religious complex which combines a
315 main cultic centre (totally covered by sediments) with economic and domestic facilities
316 (of which parts were previously excavated). The accurate positioning of probable
317 archaeological structures has allowed setting up targeted excavations that led to
318 important results: parts of the irrigation network were already used from the 8th or 7th
319 century B.C. in the vicinity of the temples, the site was used for cultic purposes to at
320 least the 2nd century B.C. and was impacted by a rapid environmental change from
321 humid to arid in the latest periods of occupation. Without the piloting assistance
322 provided by the magnetic mapping, the thickness of the sedimentary deposits would
323 have discouraged any attempt to explore the underground by means of the classical
324 archaeological digging methods. A next step would be to investigate further the
325 supposed cultic centre and the associated environmental change to find further
326 chronological and functional data. According to its size and the thickness of sediment,
327 the study would need the combination of archaeological excavations and a more
328 detailed geophysical method. In consequence, these conclusions encouraged the
329 Egyptian Supreme Council of Antiquities (SCA) to delimit a protection area in 2014 to
330 avoid the destruction of remains by the fast progression of agricultural fields.

331 **Acknowledgement**

332 The authors would like to thank the Initiatives d'Excellence (IdEx, Programme
333 Investissements d'Avenir) of the University of Strasbourg for their financial support as
334 well as Daniel Sauter and Nicolas Florsch for their advices and constructive comments.

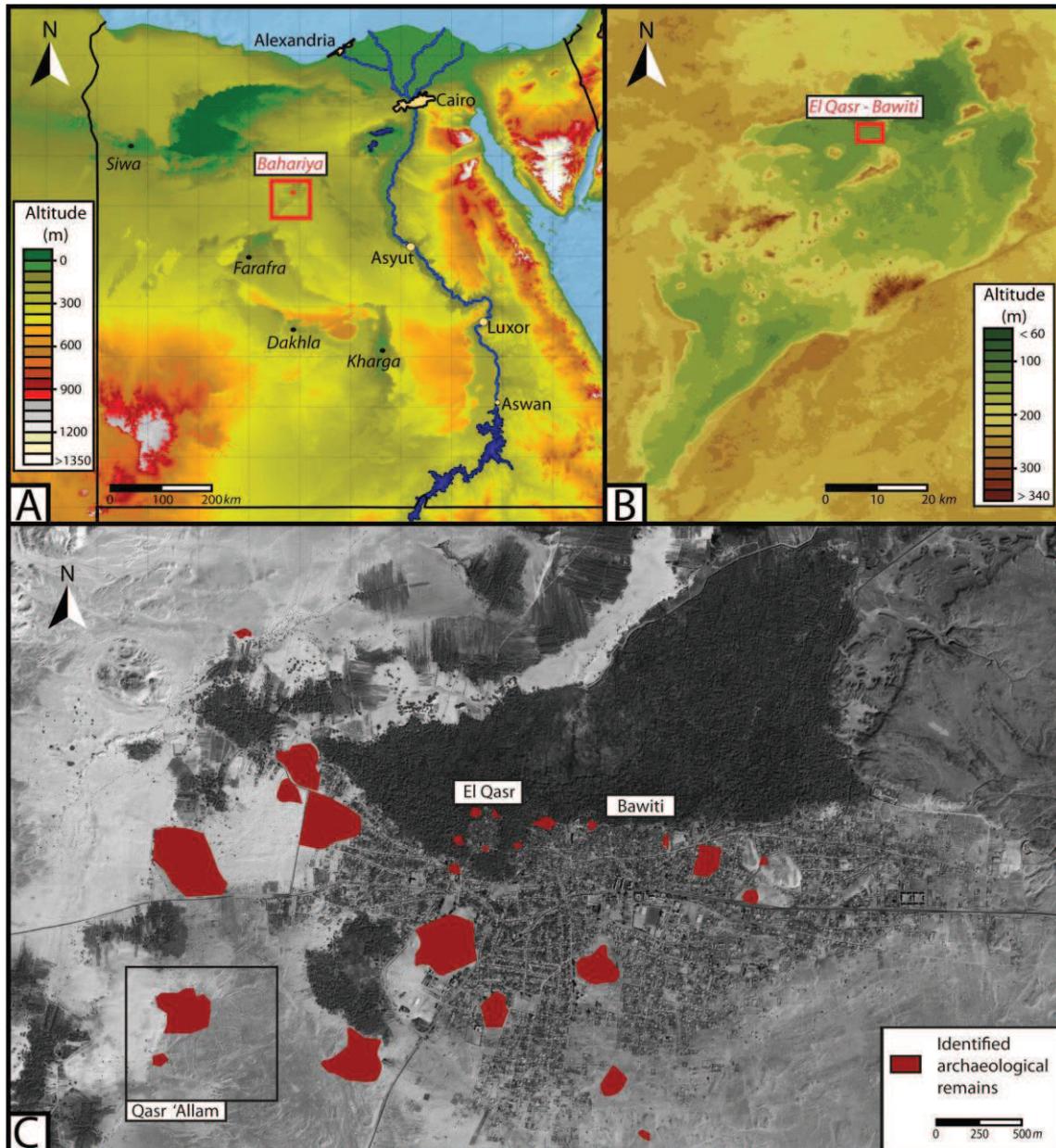
335 **References**

- 336 Baranov V. 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudo-
337 gravimetric anomalies. *Geophysics* **22**: 359–383. DOI: 10.1190/1.1438369
- 338 Bhattacharyya BK. 1965. Two-dimensional harmonic analysis as a tool for magnetic
339 interpretation. *Geophysics* **30**: 829–857. DOI: 10.1190/1.1439658

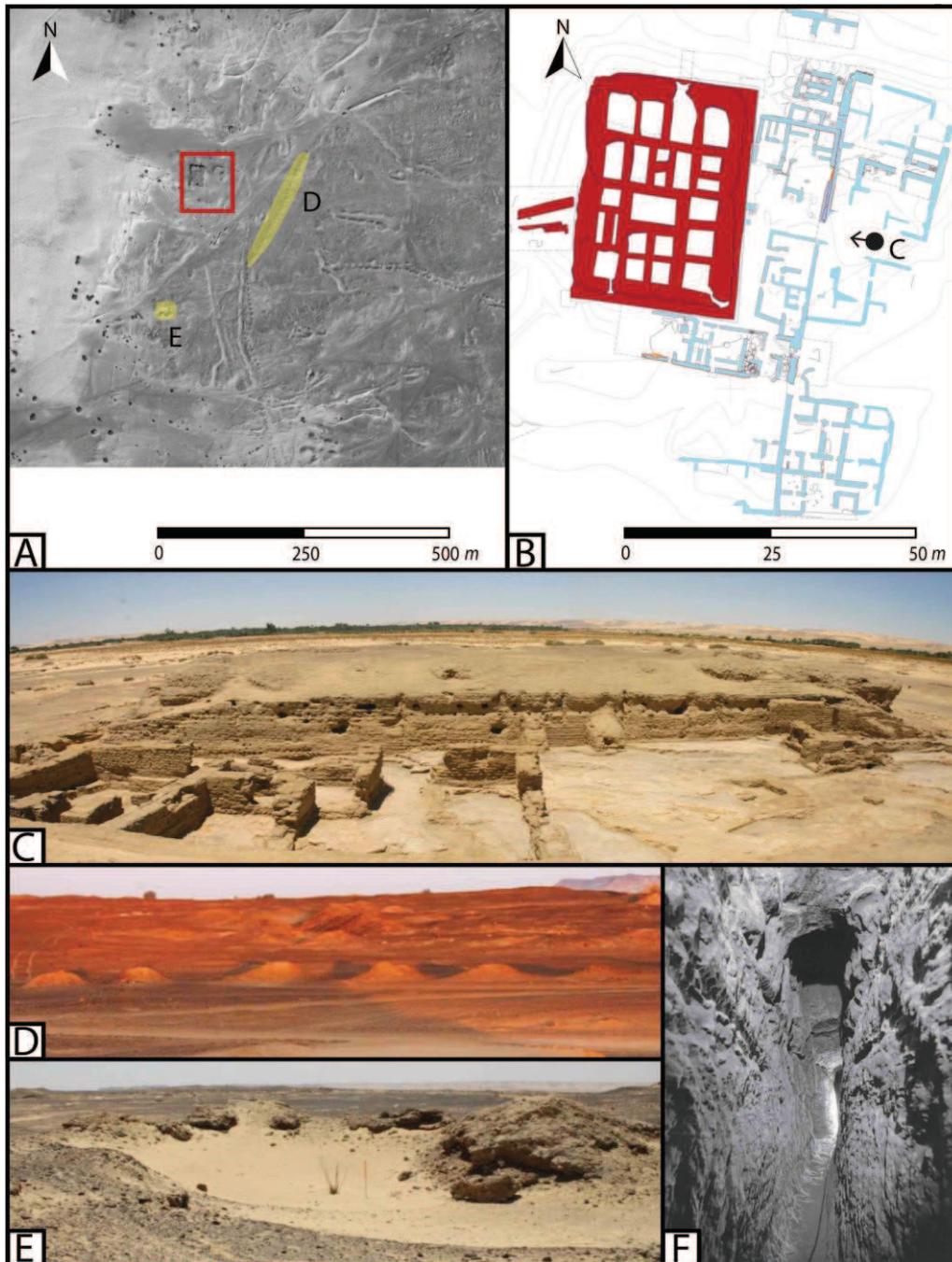
- 340 Blakely RJ. 1995. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge
341 University Press. ISBN: 0-521-41508-X
- 342 Colin F. 2007. Bahariya. In: Pantalacci L, Denoix S (Eds.). Travaux de l'Institut
343 Français d'Archéologie Orientale en 2006-2007. *Bulletin de l'Institut Français*
344 *d'Archéologie Orientale* **107**: 313-318.
- 345 Colin F. 2010. Bahariya. In: Midant-Reynes B, Denoix S (Eds.). Travaux de l'Institut
346 Français d'Archéologie Orientale en 2009-2010. *Bulletin de l'Institut Français*
347 *d'Archéologie Orientale* **110**: 326-331.
- 348 Colin F. 2011. Le « Domaine d'Amon » à Bahariya de la XVIIIe à la XXVIe dynastie :
349 l'apport des fouilles de Qasr 'Allam. in: Devauchelle D. (Ed.), *La XXVIe Dynastie*
350 *Continuités et Ruptures. Actes Du Colloque International Organisé Les 26 et 27*
351 *Novembre 2004 à l'Université Charles-de-Gaulle – Lille 3. Promenade Saïte Avec Jean*
352 *Yoyotte*: 47 – 84. Paris.
- 353 Colin F. 2013a. Les gisements archéologiques de Psôbthis au début du XXIe siècle :
354 Diagnostic sur un paysage menacé et nouvelles orientations de recherche. in: Dospěl,
355 M., Suková, L (Eds.). *Bahriya Oasis: Recent Research into the Past of an Egyptian*
356 *Oasis*: 151–184. Charles University; Prague.
- 357 Colin F. 2013b. Bahariya. Pratiques funéraires et lieux de culte. In: Midant-Reynes B
358 (Ed.). Rapport d'activité 2012-2013, *Supplément au Bulletin de l'Institut Français*
359 *d'Archéologie Orientale* **113**: 246–251.
- 360 Colin F, Duvette C. 2012. Bahariya. Pratiques funéraires et lieux de culte. In: Midant-
361 Reynes B (Ed.). Rapport d'activité 2011-2012, *Supplément au Bulletin de l'Institut*
362 *Français d'Archéologie Orientale* **112**: 159–165.
- 363 Colin F, Duvette C, Gavazzi B, Munsch M, Schuster M, Schwarz D. 2014. Bahariya.
364 Pratiques funéraires et lieux de culte. In: Midant-Reynes B (Ed.). Rapport d'activité
365 2013-2014, *Supplément au Bulletin de l'Institut Français d'Archéologie Orientale* **114**:
366 195–201.
- 367 Fedi M, Florio G. 2003. Decorrugation and removal of directional trends of magnetic
368 fields by the wavelet transform: application to archaeological areas. *Geophysical*
369 *Prospecting* **51**: 261–272. DOI: 10.1046/j.1365-2478.2003.00373.x
- 370 Finlay CC, Maus S, Bondar TN, Chambodut A, Chernova TA, Chulliat A, Golovkov
371 VP, Hamilton B, Hamoudi M, Holme R, Hulot G, Kuang W, Langlais B, Lesur V,
372 Lowes FJ, Lühr H, Macmillan S, Mandeia M, McLean S, Manoj C, Menvielle M,
373 Michaelis I, Olsen N, Rauberg J, Rother M, Sabaka TJ, Tangborn A, Tøffner-Clausen
374 L, Thébaud E, Thomson AWP, Wardinski I, Wei Z, Zvereva TI. 2010. International
375 Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation. *Geophysical Journal*
376 *International* **183**: 1216–1230. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2010.04804.x
- 377 Gaffney C. 2008. Detecting Trends in the Prediction of the Buried Past: A Review of
378 Geophysical Techniques in Archaeology. *Archaeometry* **50**: 313–336. DOI:
379 10.1111/j.1475-4754.2008.00388.x

- 380 Herbich T. 2011. Geophysical surveying in Egypt: periodic report for 2009-2011. in:
381 Drahor MG, Berge MA. Archaeological Propection. *9th International Conference on*
382 *Archaeological Propection, September 19-24, 2011 Izmir (Turkey)*: 234-239. Istanbul.
- 383 Labrique F, Colin F. 2003. Recherches de terrain en Égypte. Chronique. *Dialogues*
384 *d'histoire ancienne* **29** (2): 165-185. DOI: 10.3406/dha.2003.1569
- 385 Leclère F. 2008. *Les villes de Basse Égypte au Ier millénaire av. J.-C. Analyse*
386 *archéologique et historique de la topographie urbaine*. Bibliothèque d'étude 144/2.
387 IFAO. Le Caire. ISBN: 978-2-7247-0491-4
- 388 Linford N. 2006. The application of geophysical methods to archaeological propection.
389 *Reports on Progress in Physics* **69**: 2205–2257. DOI: 10.1088/0034-4885/69/7/R04
- 390 Malecka-Drozd N. 2014. The emergence and development of architecture on the
391 casemate foundation platforms in the Nile Delta. *Recherches Archéologiques Nouvelle*
392 *Série* **4**: 69-96.
- 393 Munschy M, Boulanger D, Ulrich P, Bouiflane M. 2007. Magnetic mapping for the
394 detection and characterization of UXO: Use of multi-sensor fluxgate 3-axis
395 magnetometers and methods of interpretation. *Journal of Applied Geophysics* **61**: 168–
396 183. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2006.06.004
- 397 Nabighian MN, Grauch VJS, Hansen RO, LaFehr TR, Li Y, Peirce JW, Phillips JD,
398 Ruder ME. 2005. 75th Anniversary: The historical development of the magnetic method
399 in exploration. *Geophysics* **70**: 33–61. DOI: 10.1190/1.2133784
- 400 Olsen N, Tøffner-Clausen L, Sabaka TJ, Brauer P, Merayo JMG, Jörgensen JL, Léger
401 JM, Nielsen OV, Primdahl F, Risbo T. 2003. Calibration of the Ørsted vector
402 magnetometer. *Earth, Planets, and Space* **55**: 11–18. DOI: 10.1186/BF03352458
- 403 Primdahl F. 1979. The fluxgate magnetometer. *Journal of Physics E: Scientific*
404 *Instruments* **12**: 241-253. DOI: 10.1088/0022-3735/12/4/001
- 405 Reuter HI, Nelson A, Jarvis A. 2007. An evaluation of voidfilling interpolation methods
406 for SRTM data. *International Journal of Geographical Information Science* **21(9)**: 983–
407 1008. DOI: 10.1080/13658810601169899
- 408 Spencer AJ. 1979. The brick foundations of Late Period peripteral temples and their
409 mythological origin. In: Ruffle J, Gaballa G, Kitchen K (Eds). *Glimpses of Ancient*
410 *Egypt. Studies in Honour of H.W. Fairman*: 132-137. Aris & Philips; Warminster.
- 411 Svoboda JA. 2006. Prehistory of the southern Bahariya Oasis, Western Desert, Egypt.
412 An outline. *Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia* **28**: 18–30. DOI:
413 10.1134/s1563011006040037
- 414 Svoboda JA. 2013. Prehistory of the Southern Bahariya: A case Study in Northeast
415 African Settlement Archaeology. in Dospěl, M., Suková, L. (Eds.), *Bahriya Oasis.*
416 *Recent Research into the Past of an Egyptian Oasis*: 35-62. Charles University; Prague.

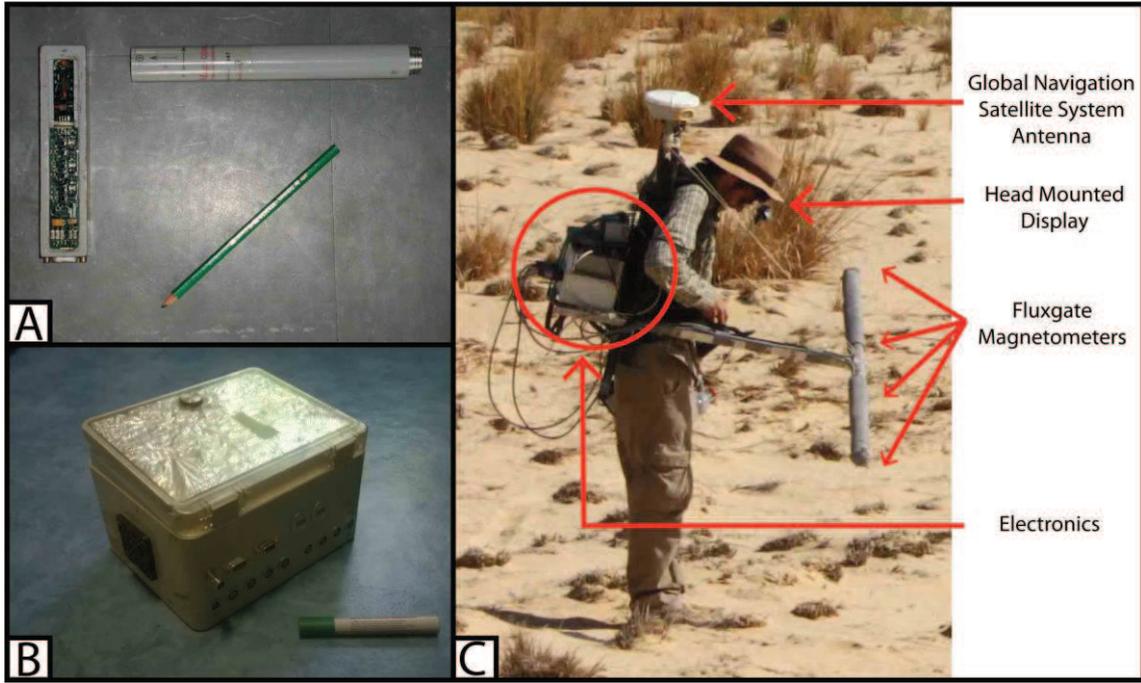
- 417 Traunecker M. 1987. Les "temples hauts" de Basse époque : un aspect du
418 fonctionnement économique des temples, *Revue d'égyptologie* **38**: 147–162. DOI:
419 10.2143/RE.38.0.2011639
- 420 Wuttman M, Bousquet B, Chauveau M, Dils P, Marchand S, Schweitzer A, Volay L.
421 1996. Premier rapport préliminaire des travaux sur le site de 'Ayn Manawir (oasis de
422 Kharga). *Bulletin de l'Institut Français d'Archéologie Orientale* **96**: 385 – 451.
- 423



424
 425 Figure 1: A- Localization of the oasis of Bahariya on a topographic map of Egypt. B-
 426 Localization of El Qasr-Bawiti on a topographic map of Bahariya. C- Localization of the site of
 427 Qasr 'Allam on a satellite image of El Qasr and Bawiti. Topography from SRTM90 data made
 428 available by the International Center For Tropical Agriculture (CIAT) at
 429 <http://srtm.csi.cgiar.org/> (Reuter *et al.*, 2007). Satellite image from the satellites Quickbird taken
 430 in 2003 (DigitalGlobe Incorporated, Eurimage SPA licence).
 431

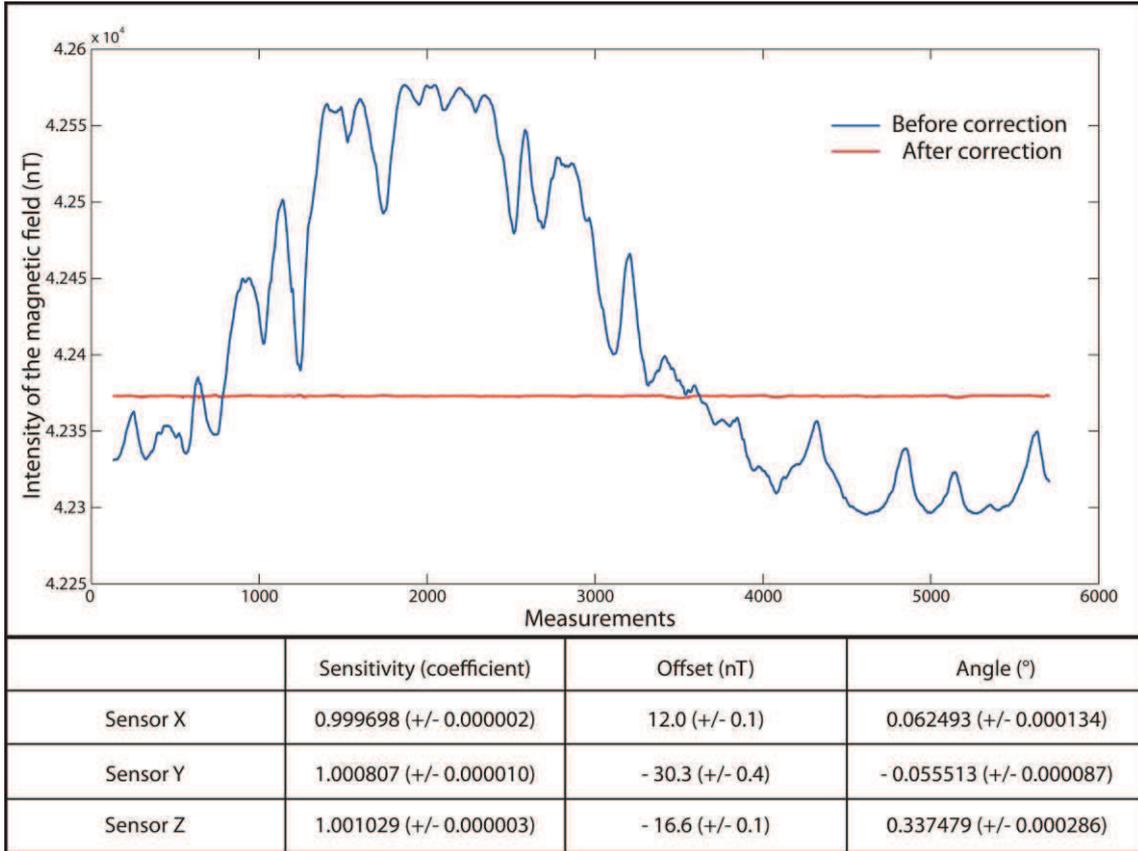


432
 433 Figure 2: A- Localization of the excavated dwelling (red) and the irrigation structures of the
 434 pictures D and E (yellow) on a satellite image of Qasr 'Allam (DigitalGlobe Incorporated,
 435 Eurimage SPA licence). B- Architectural plan of the excavated dwelling and orientation of the
 436 picture C. Blue and red colours corresponds to buildings of a first and second period of
 437 occupation. C- Lateral view of the cellular foundation platform of the second period of
 438 occupation. D- Traces of an underground channel. E- Traces of a well. F- Inside of an
 439 underground channel similar to the ones of the site and excavated in the oasis of Kharga
 440 (Wuttmann *et al.*, 1996).



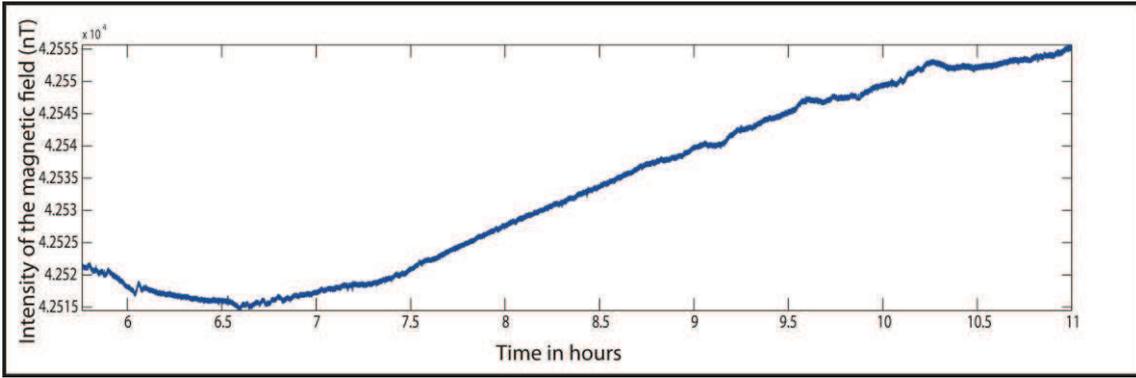
441
 442
 443
 444
 445

Figure 3: A- 3-axis fluxgate magnetometer (Bartington Inc., Mag-03 MC). B- Custom electronics with 8 magnetometer inputs developed by the IPGS. C- Multi-sensor device developed by the IPGS.



446
447
448
449
450

Figure 4: Intensity of the magnetic field measured by one magnetometer during the calibration and compensation process of the device before (blue) and after (red) corrections. Computed error parameters are given in the lower part of the figure.

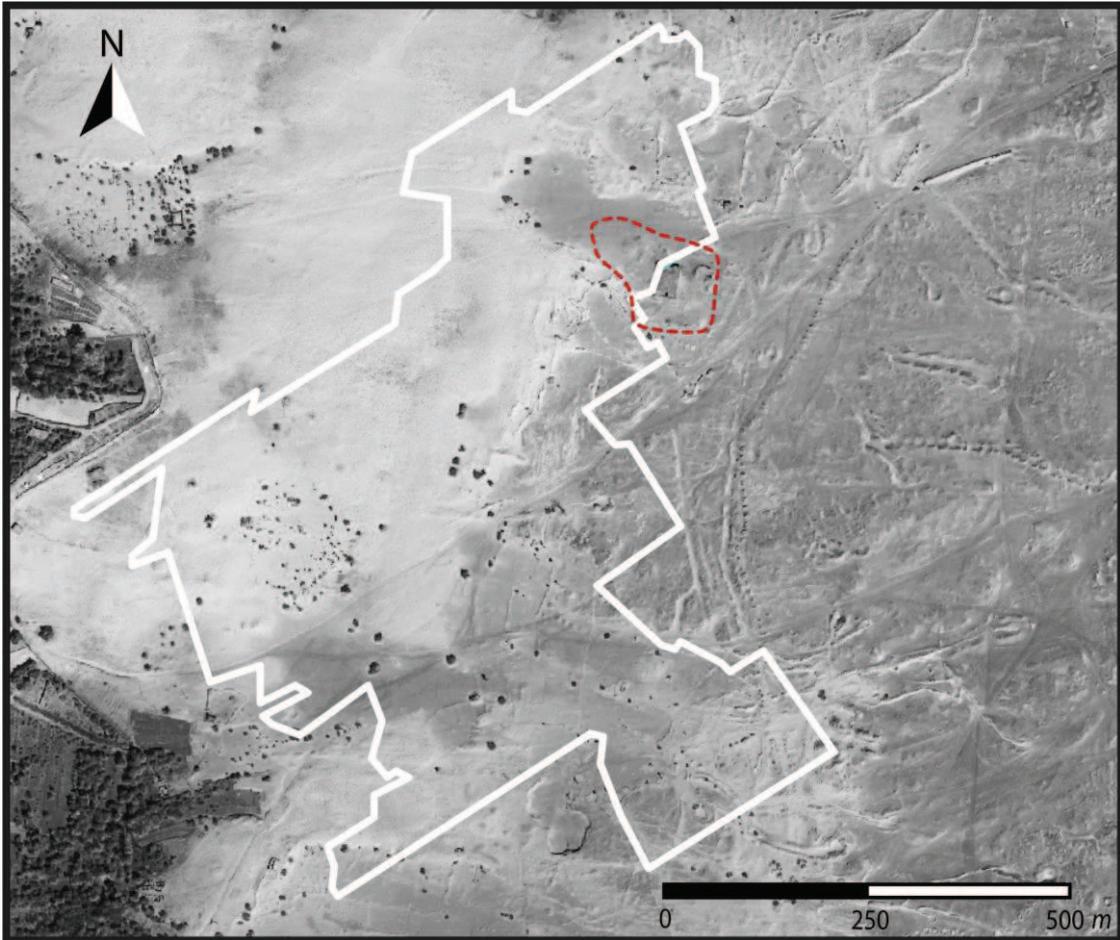


451

452 Figure 5: Intensity of the magnetic field measured by a magnetometer over a fixed point in Qasr

453 'Allam during the hours of prospection.

454



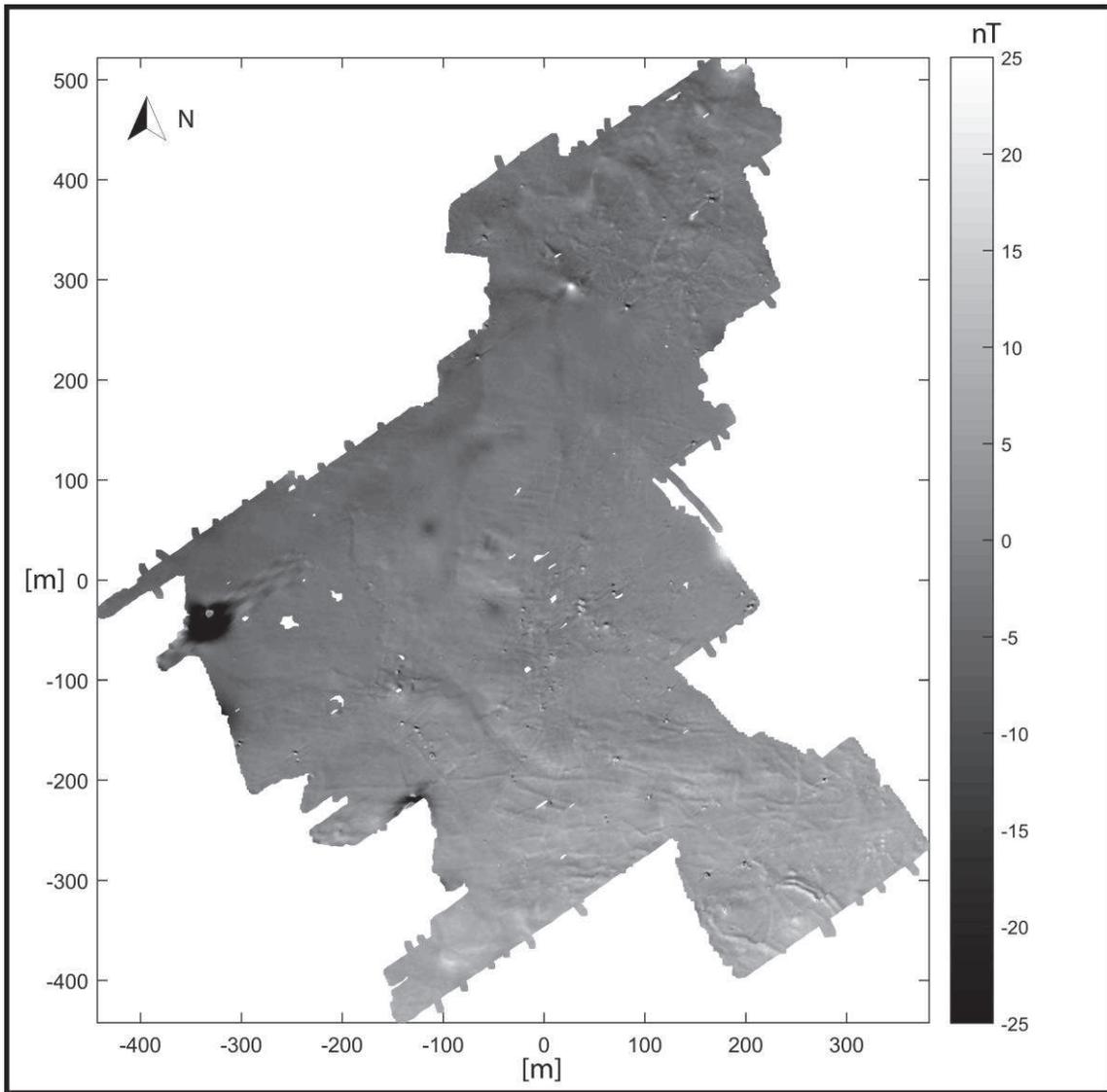
455

456 Figure 6: Satellite image of Qasr 'Allam (DigitalGlobe Incorporated, Eurimage SPA licence).

457 The area of the geomagnetic prospection is delimited by the white line. The area of the

458 excavated dwelling is delimited by the red line.

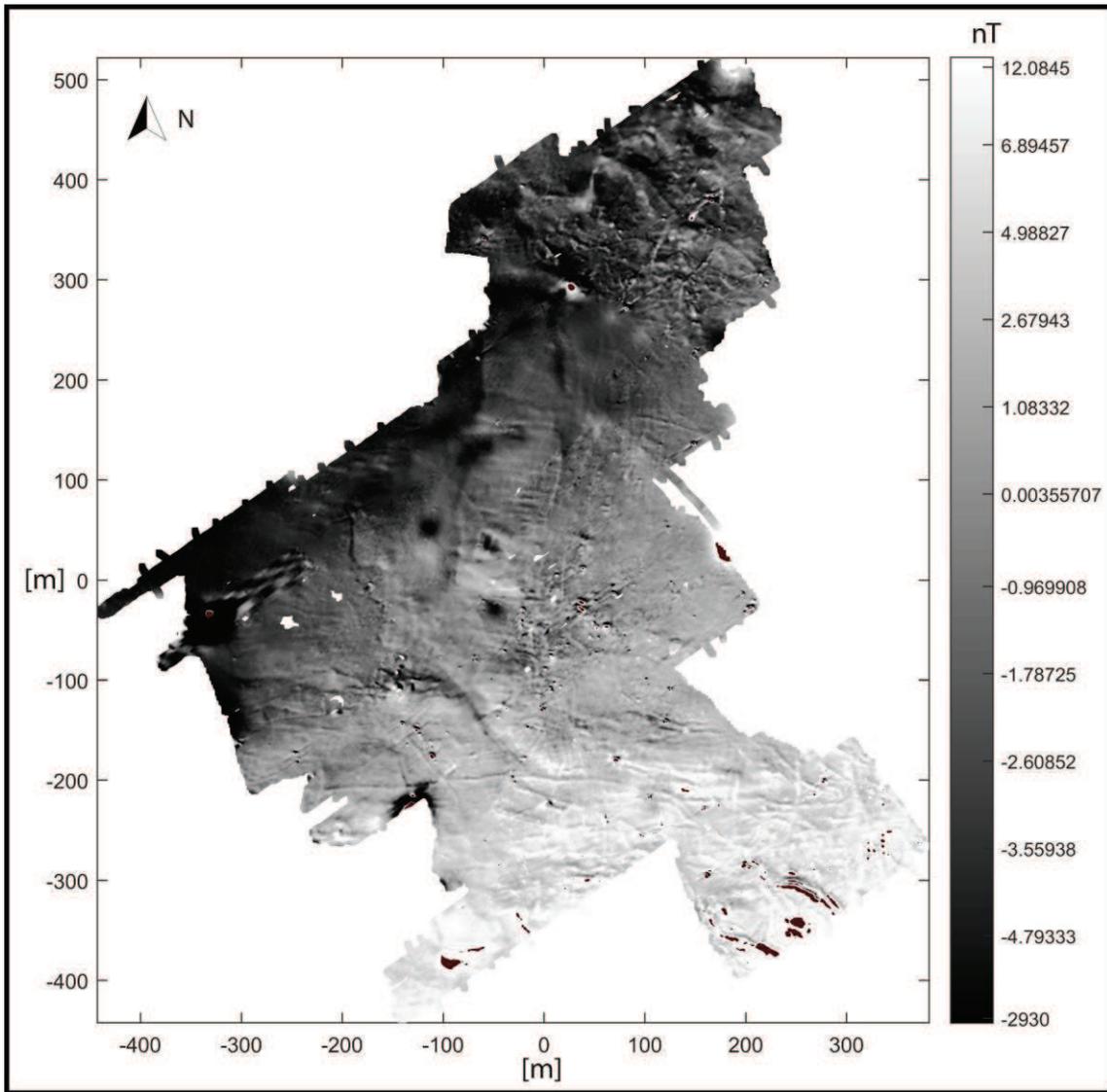
459



460

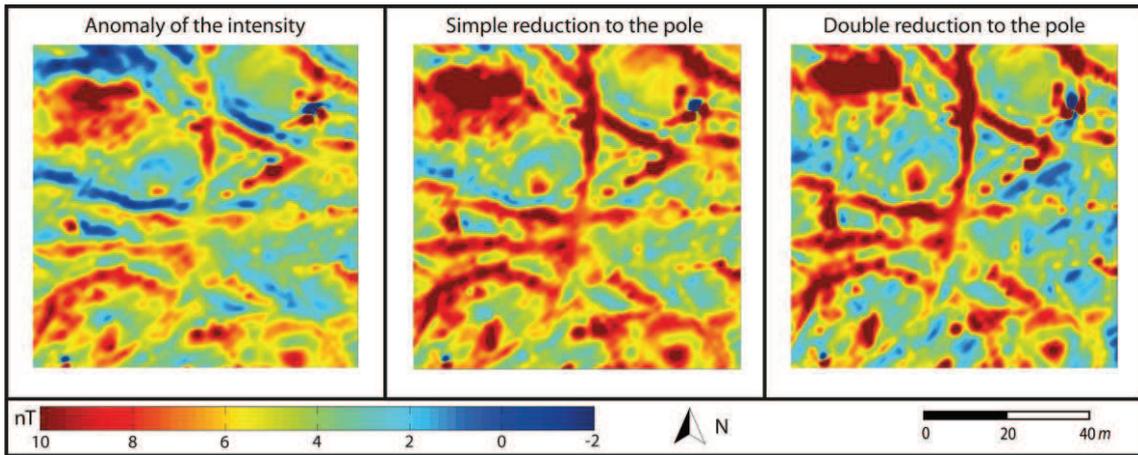
461 Figure 7: Map of the magnetic anomaly represented with a linear grayscale bar ranging from -50
462 to 50 nT.

463



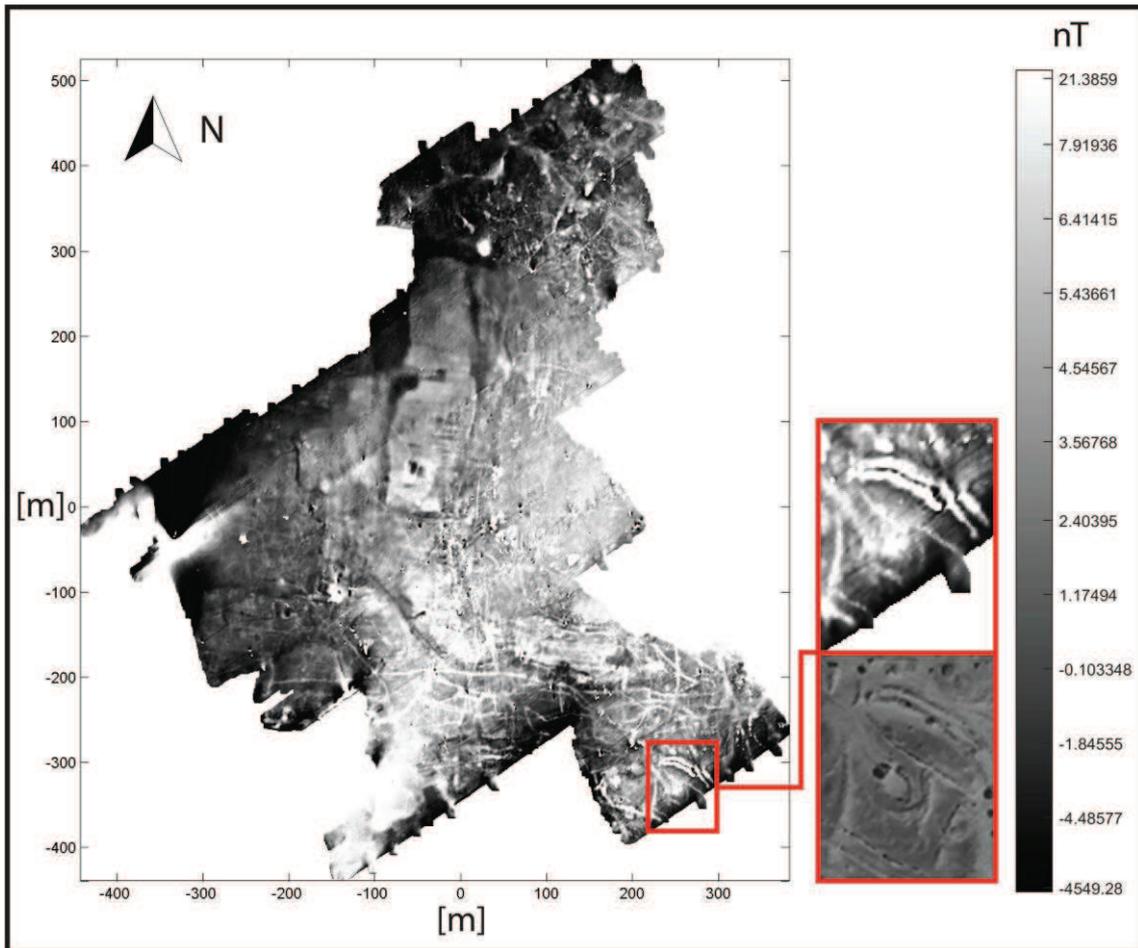
464
 465
 466

Figure 8: Map of magnetic anomalies represented with an equi-populated greyscale bar.



467
 468
 469
 470

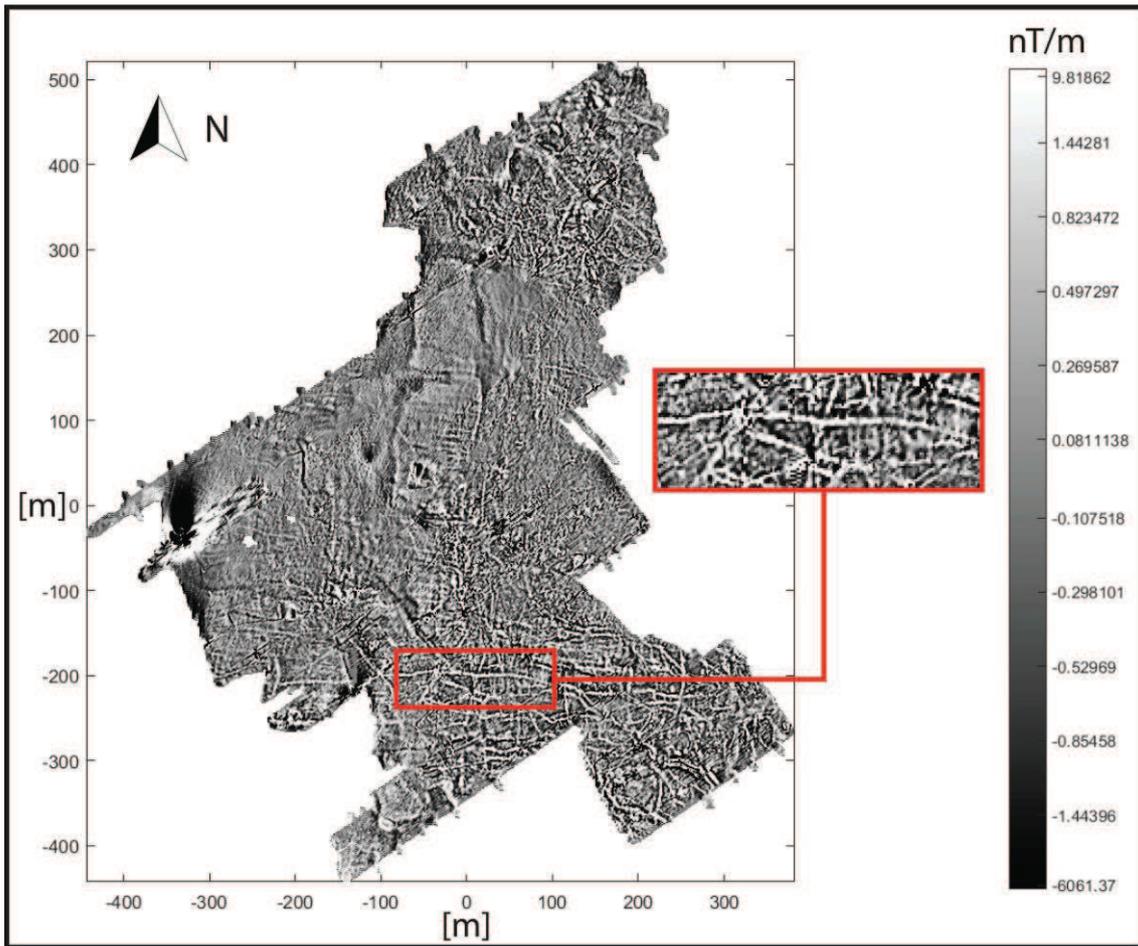
Figure 9: Map of the anomaly of the intensity of a sampled zone of Qasr ‘Allam, its simple and double reduction to the pole with similar directions of regional field and magnetization.



471

472 Figure 10: Map of the magnetic anomaly after double reduction to the pole represented with an
 473 equi-populated greyscale bar. The enlargement and associated satellite image correspond to the
 474 area delimited in red.

475

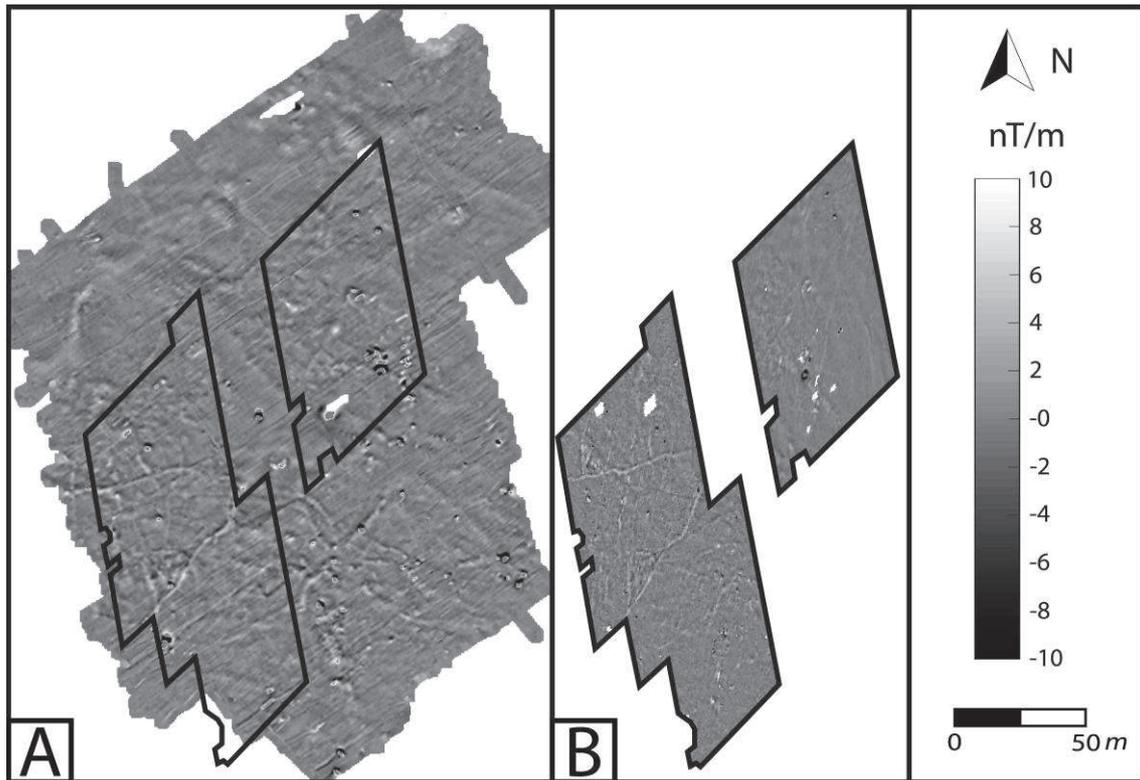


476

477 Figure 11: Map of the vertical derivative of the magnetic anomaly after double reduction
 478 represented with an equi-populated greyscale bar. The enlargement corresponds to the area
 479 delimited in red.

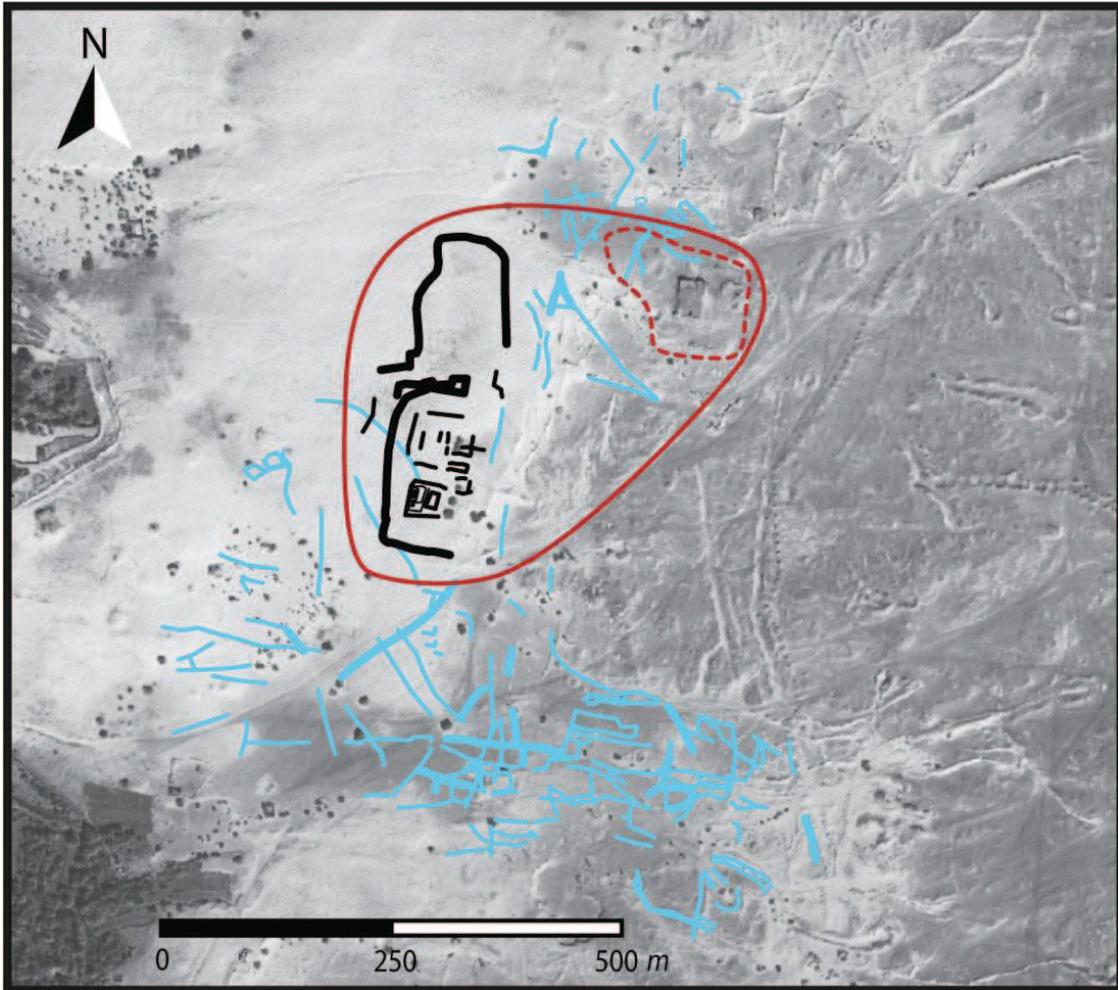
480

481



482

483 Figure 12: A- Map of the gradient calculated by vertical derivative from the data acquired by the
 484 device developed in this study. B- Map of the gradient measured with a vector gradiometer
 485 Geoscan FM256 (Tomasz Herbich).



486
487
488
489
490

Figure 13: Interpretative map of the archaeological remains from the geomagnetic prospection. The hydraulic structures are represented in blue, the buildings in black. The dotted and plain red lines mark the minimal limits of the dwelling known before and after the study.

Bibliographie

Adam, F. & Colin, F. (2012), Inhumations d'enfants et de chiens à Qasr 'Allam, Bahariya, Égypte, dans M.D. Nenna, (éd.), *L'Enfant et la mort dans l'Antiquité II, Types de tombes et traitement du corps des enfants dans l'Antiquité gréco-romaine*, Actes de la table ronde internationale organisée au Centre d'Études Alexandrines du 12 au 14 novembre 2009, Alexandrie (Études alexandrines 26), pp. 315–329.

Aitken, M.J. (1958), Magnetic prospecting. I. The Water Newton survey, *Archaeometry* 1, pp. 24–26, doi:10.1111/j.1475-4754.1958.tb00204.x.

Bakbakhi, M. (2006), Nubian Sandstone Aquifer System, dans S. Foster & D.P. Loucks, (éds.), *Non-renewable Groundwater Resources : A Guidebook on Socially Sustainable Management for Water-Policy Makers*, Series on groundwater 10, pp. 75–81.

Baranov, V. (1957), A new method for interpretation of aeromagnetic maps : pseudo-gravimetric anomalies, *Geophysics* 22 (2), pp. 359–383, doi:10.1190/1.1438369.

Bhattacharyya, B.K. (1964), Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization, *Geophysics* 29 (4), pp. 517–531, doi:10.1190/1.1439386.

Bhattacharyya, B.K. (1965), Two-dimensional harmonic analysis as a tool for magnetic interpretation, *Geophysics* 30 (5), pp. 829–857, doi:10.1190/1.1439658.

Bhattacharyya, B.K. & Navolio, M.E. (1976), A fast fourier transform method for rapid computation of gravity and magnetic anomalies due to

- prism-shaped bodies with arbitrary polarization, *Geophysical Prospecting* 24 (4), pp. 633–649, doi:10.1111/j.1365-2478.1976.tb01562.x.
- Bietak, M. (2005)**, The Tuthmoside stronghold of Perunefer, *Egyptian Archaeology* 26, pp. 13–17.
- Bietak, M. & Forstner-Müller, I. (2006)**, Eine Palatiale Anlage der Frühen Hyksoszeit (Areal F/II), *Ägypten und Levante / Egypt and the Levant* 16, pp. 63–78, doi:10.1553/AEundL16s63.
- Blakely, R.J. (1995)**, *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*, Cambridge University Press.
- Bott, M.H.P. (1963)**, Two methods applicable to computers for evaluating magnetic anomalies due to finite three dimensional bodies, *Geophysical Prospecting* 11, pp. 292–299, doi:10.1111/j.1365-2478.1963.tb02039.x.
- Brookfield, M. (2011)**, The Desertification of the Egyptian Sahara during the Holocene (the Last 10,000 years) and its Influence on the Rise of Egyptian Civilization, dans I.P. Martini & W. Chesworth, (éds.), *Landscapes and Societies*, pp. 91–108, Springer Netherlands, ISBN 978-90-481-9412-4, doi:10.1007/978-90-481-9413-1_6.
- Bubbenzer, O. & Riemer, H. (2007)**, Holocene climatic change and human settlement between the central Sahara and the Nile Valley : Archaeological and geomorphological results, *Geoarchaeology* 22 (6), pp. 607–620, doi:10.1002/gea.20176.
- Catuneanu, O., Khalifa, M. & Wanas, H. (2006)**, Sequence stratigraphy of the Lower Cenomanian Bahariya Formation, Bahariya Oasis, Western Desert, Egypt, *Sedimentary Geology* 190 (1–4), pp. 121 – 137, doi:10.1016/j.sedgeo.2006.05.010.
- Colin, F. (2006)**, Bahariya, dans L. Pantalacci & S. Denoix, (éds.), *Travaux de l'Institut français d'archéologie orientale en 2005-2006*, Bulletin de l'Institut Français d'Archéologie Orientale 106, pp. 404–409.

- Colin, F. (2007)**, Bahariya, dans L. Pantalacci & S. Denoix, (éds.), *Travaux de l'Institut français d'archéologie orientale en 2006-2007*, Bulletin de l'Institut Français d'Archéologie Orientale 107, pp. 313–318.
- Colin, F. (2010)**, Bahariya, dans B. Midant-Reynes & S. Denoix, (éds.), *Travaux de l'Institut français d'archéologie orientale en 2009-2010*, Bulletin de l'Institut Français d'Archéologie Orientale 110, pp. 326–331.
- Colin, F. (2011)**, Le "Domaine d'Amon" à Bahariya de la XVIII^e à la XXVI^e dynastie : l'apport des fouilles de Qasr 'Allam, dans D. Devauchelle, (éd.), *La XXVI^e dynastie continuités et ruptures, Promenade Saïte avec Jean Yoyotte*, Actes du colloque international organisé les 26 et 27 novembre 2004 à l'université Charles de Gaulle (Lille 3), Paris, pp. 47–84.
- Colin, F. (2013a)**, Bahariya. Pratiques funéraires et lieux de culte, dans B. Midant-Reynes, (éd.), *Rapport d'activité 2012-2013*, Supplément au Bulletin de l'Institut Français d'Archéologie Orientale 113, pp. 246–251.
- Colin, F. (2013b)**, Les gisements archéologiques de Psôbthis au début du XXI^e siècle : diagnostic sur un paysage menacé et nouvelles orientations de recherche, dans M. Dospěl & L. Suková, (éds.), *Bahriya Oasis : Recent Research into the Past of an Egyptian Oasis*, Charles University, Prague, pp. 151–184.
- Colin, F. & Duvette, C. (2012)**, Bahariya. Pratiques funéraires et lieux de culte, dans B. Midant-Reynes, (éd.), *Rapport d'activité 2011-2012*, Supplément au Bulletin de l'Institut Français d'Archéologie Orientale 112, pp. 159–165.
- Colin, F., Duvette, C., Gavazzi, B., Munsch, M., Schuster, M. & Schwatrz, D. (2014)**, Bahariya. Pratiques funéraires et lieux de culte, dans B. Midant-Reynes, (éd.), *Rapport d'activité 2013-2014*, Supplément au Bulletin de l'Institut Français d'Archéologie Orientale 114, pp. 195–201.
- Colin, F. & Labrique, F. (2001)**, Recherches archéologiques dans l'Oasis de Bahariya (1997-2000), *Dialogues d'histoire ancienne* 27 (1), pp. 159–192, doi:10.3406/dha.2001.2541.

- Cooper, G.R.J. & Cowan, D.R. (2003)**, The application of fractional calculus to potential field data, *Exploration Geophysics* 34, pp. 51–56, doi:10.1071/EG03051.
- Cooper, G.R.J. & Cowan, D.R. (2006)**, Enhancing potential field data using filters based on the local phase, *Computers & Geosciences* 32, pp. 1585–1591, doi:10.1016/j.cageo.2006.02.016.
- Courtillot, V. & Le Mouël, J.L. (1988)**, Time Variations of the Earth's Magnetic Field : From Daily to Secular, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 16 (1), pp. 389–476, doi:10.1146/annurev.ea.16.050188.002133.
- Courtillot, V. & Le Mouël, J.L. (2007)**, The study of Earth's magnetism (1269–1950) : A foundation by Peregrinus and subsequent development of geomagnetism and paleomagnetism, *Reviews of Geophysics* 45 (3), pp. 1–31, doi:10.1029/2006RG000198.
- Crombie, M., Arvidson, R., Sturchio, N., El Alfy, Z. & Abu Zeid, K. (1997)**, Age and isotopic constraints on Pleistocene pluvial episodes in the Western Desert, Egypt, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 130 (1–4), pp. 337 – 355, doi:10.1016/S0031-0182(96)00134-4.
- Fakhry, A. (1942)**, *The Egyptian Desert : Bahria Oasis. Vol. 1*, Cairo : Government Press.
- Fakhry, A. (1950)**, *The Egyptian Desert : Bahria Oasis. Vol. 2*, Cairo : Government Press.
- Fakhry, A. (1974)**, *The Oasis of Egypt. Vol 2 : Bahariya and Farafra*, Cairo : AUC press.
- Finlay, C.C., Maus, S., Beggan, C.D., Bondar, T.N., Chambodut, A., Chernova, T.A., Chulliat, A., Golovkov, V.P., Hamilton, B., Hamoudi, M., Holme, R., Hulot, G., Kuang, W., Langlais, B., Lesur, V., Lowes, F.J., Lühr, H., Macmillan, S., Manda, M., McLean, S., Manoj, C., Menvielle, M., Michaelis, I., Olsen, N.,**

- Rauberg, J., Rother, M., Sabaka, T.J., Tangborn, A., Tøffner-Clausen, L., Thébaud, E., Thomson, A.W.P., Wardinski, I., Wei, Z. & Zvereva, T.I. (2010)**, International Geomagnetic Reference Field : the eleventh generation, *Geophysical Journal International* 183 (3), pp. 1216–1230, doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04804.x.
- Forstner-Müller, I., Herbich, T., Schweitzer, C. & Weissl, M. (2008)**, Preliminary Report on the Geophysical Survey at Tell el-Dab'a/Qantir in Spring 2008, *Ägypten und Levante / Egypt and the Levant* 18, pp. 87–106, doi:10.1553/AEundL18s87.
- Gaffney, C. (2008)**, Detecting Trends in the Prediction of the Buried Past : a Review of Geophysical Techniques in Archaeology, *Archaeometry* 50 (2), pp. 313–336, doi:10.1111/j.1475-4754.2008.00388.x.
- Gilbert, W. (1600)**, *De Magnete, Magneticisque Corporibus, Et De Magno magnete tellure; Physiologia noua, plurimis & argumentis, & experimentis demonstrata*, Peter Short.
- Grauch, V.J.S. & Cordell, L. (1987)**, Limitations of determining density or magnetic boundaries from the horizontal gradient of gravity or pseudo-gravity data, *Geophysics* 52 (1), pp. 118–121, doi:10.1190/1.1442236.
- Hadamard, M. (1907)**, Les problèmes aux limites dans la théorie des équations aux dérivées partielles, *Journal de Physique Théorique et Appliquée* 6 (1), pp. 202–241, doi:10.1051/jphystap :019070060020200.
- Hamdan, A.M. & Sawires, R.F. (2011)**, Hydrogeological studies on the Nubian sandstone aquifer in El-Bahariya Oasis, Western Desert, Egypt, *Arabian Journal of Geosciences* 6 (5), pp. 1333–1347, doi:10.1007/s12517-011-0439-8.
- Henderson, R. & Zietz, I. (1949)**, The upward continuation of anomalies in total magnetic intensity fields, *Geophysics* 14 (4), pp. 517–534, doi:10.1190/1.1437560.

- Herbich, T. (2011)**, *Geophysical surveying in Egypt : periodic report for 2009-2011*, Institute of Archaeology and Ethnology Polish Academy of Sciences.
- Herbich, T. & Peeters, C. (2006)**, Results of the magnetic survey at Deir al-Barsha, *Archaeological Prospection* 13 (1), pp. 11–24, doi:10.1002/arp.263.
- Herbich, T. & Spencer, A.J. (2006)**, Geophysical survey at Tell el-Balamun, *Egyptian Archaeology* 29, pp. 16–19.
- Hulot, G., Finlay, C.C., Constable, C.G., Olsen, N. & Manda, M. (2010)**, The Magnetic Field of Planet Earth, *Space Science Review* 152, pp. 159–222, doi:10.1007/s11214-010-9644-0.
- Kindermann, K., Bubbenzer, O., Nussbaum, S., Riemer, H., Darius, F., Pöllath, N. & Smettan, U. (2006)**, Palaeoenvironment and Holocene land use of Djara, Western Desert of Egypt, *Quaternary Science Reviews* 25 (13–14), pp. 1619 – 1637, doi:10.1016/j.quascirev.2005.12.005.
- Kuper, R. & Kröpelin, S. (2006)**, Climate-Controlled Holocene Occupation in the Sahara : Motor of Africa’s Evolution, *Science* 313 (5788), pp. 803–807, doi:10.1126/science.1130989.
- Labrique, F. & Colin, F. (2003)**, Recherches de terrain en Égypte. Chronique, *Dialogues d’histoire ancienne* 29 (2), pp. 165–185, doi:10.3406/dha.2003.1569.
- Leclère, F. (2008)**, Les villes de Basse Égypte au Ier millénaire av. J.-C. Analyse archéologique et historique de la topographie urbaine., *Bibliothèque d’étude* 144 (2).
- Linford, N. (2006)**, The application of geophysical methods to archaeological prospection, *Reports on Progress in Physics* 69 (7), pp. 2205–2257, doi:10.1088/0034-4885/69/7/R04.

- Linping, H., Zhining, G. & Changli, Y. (1997)**, Comment on : ‘An analytic signal approach to the interpretation of total field magnetic anomalies’ by Shuang Qin, *Geophysical Prospecting* 45 (5), pp. 879–881, doi:10.1046/j.1365-2478.1997.550290.x.
- Malecka-Drozd, N. (2014)**, The emergence and development of architecture on the casemate foundation platforms in the Nile Delta, *Recherches Archéologiques Nouvelle Serie* 4, pp. 69–96.
- Meshref, W.M. (1990)**, Tectonic framework, dans R. Said, (éd.), *The Geology of Egypt*, A. A. Balkema/Rotterdam/Brookfield, pp. 113–156.
- Miller, H.H. & Singh, V. (1994)**, Potential field tilt - a new concept for location of potential field sources, *Journal of Applied Geophysics* 32, pp. 213–217, doi:10.1016/0926-9851(94)90022-1.
- Mitchell, A.C. (1932)**, Chapters in the history of terrestrial magnetism, *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity* 37 (2), pp. 105–146, doi:10.1029/TE037i002p00105.
- Mitchell, A.C. (1946)**, Chapters in the history of terrestrial magnetism, *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity* 51 (3), pp. 323–351, doi:10.1029/TE051i003p00323.
- Munsch, 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, *Journal of Applied Geophysics* 61 (3–4), pp. 168 – 183, doi:10.1016/j.jappgeo.2006.06.004.
- Nabighian, M.N. (1972)**, The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section : its properties and use for automated anomaly interpretation, *Geophysics* 37 (3), pp. 507–517, doi:10.1190/1.1440276.
- Nabighian, M.N., Grauch, V.J.S., Hansen, R.O., LaFehr, T.R., Li, Y., Peirce, J.W., Phillips, J.D. & Ruder, M.E. (2005)**, 75th Anni-

versary : The historical development of the magnetic method in exploration, *Geophysics* 70 (6), pp. 33ND–61ND, doi:10.1190/1.2133784.

Olsen, N., Tøffner-Clausen, L., Sabaka, T.J., Brauer, P., Merayo, J.M.G., Jörgensen, J.L., Léger, J.M., Nielsen, O.V., Primdahl, F. & Risbo, T. (2003), Calibration of the Ørsted vector magnetometer, *Earth, Planets, and Space* 55, pp. 11–18, doi:10.1186/BF03352458.

Oswin, J. (2009), *A Field Guide to Geophysics in Archaeology*, Springer, doi:10.1007/978-3-540-76692-6.

Patterson, L.J., Sturchio, N.C., Kennedy, B.M., van Soest, M.C., Sultan, M., Lu, Z.T., Lehmann, B., Purtschert, R., El Alfy, Z., El Kaliouby, B., Dawood, Y. & Abdallah, A. (2005), Cosmogenic, radiogenic, and stable isotopic constraints on groundwater residence time in the Nubian Aquifer, Western Desert of Egypt, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 6 (1), pp. 1–19, doi:10.1029/2004GC000779.

Primdahl, F. (1979), The fluxgate magnetometer, *Journal of Physics E : Scientific Instruments* 12 (4), pp. 241–253, doi:10.1088/0022-3735/12/4/001.

Reuter, H.I., Nelson, A. & Jarvis, A. (2007), An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data, *International Journal of Geographical Information Science* 21 (9), pp. 983–1008, doi:10.1080/13658810601169899.

Reynolds, J.M. (1997), *An introduction to applied and environmental Geophysics*, John Wiley & Sons, Ltd.

Roest, W.R., Verhoef, J. & Pilkington, M. (1992), Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal, *Geophysics* 57 (1), pp. 116–125, doi:10.1190/1.1443174.

Roy, K.K. (2008), *Potential Theory in Applied Geophysics*, Springer, doi:10.1007/978-3-540-72334-9.

- Salem, A., Dhananjay, R., Jeffrey Gamey, T. & Ushijima, K. (2002)**, Analytic signal approach and its applicability in environmental magnetic investigations, *Journal of Applied Geophysics* 49, pp. 231–244, doi:10.1016/S0926-9851(02)00125-8.
- Salem, A., Williams, S., Fairhead, J.D., Ravat, D. & Smith, R. (2007)**, Tilt-depth method : A simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives, *The Leading Edge* 26 (12), pp. 1502–1505, doi:10.1190/1.2821934.
- Schultze, V., Chwala, A., Stolz, R., Schulz, M., Linzen, S., Meyer, H.G. & Schüler, T. (2007)**, A superconducting quantum interference device system for geomagnetic archaeometry, *Archaeological Prospection* 14 (3), pp. 226–229, doi:10.1002/arp.317.
- Shannon, C.E. (1949)**, Communication in the Presence of Noise, *Proceedings of the Institute of Radio Engineers* 37 (1), pp. 10–21, doi:10.1109/JRPROC.1949.232969.
- Smith, J.R., Giegengack, R. & Schwarcz, H.P. (2004)**, Constraints on Pleistocene pluvial climates through stable-isotope analysis of fossil-spring tufas and associated gastropods, Kharga Oasis, Egypt, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 206 (1–2), pp. 157 – 175, doi:10.1016/j.palaeo.2004.01.021.
- Speiser, D. & de Grave, P.R. (1975)**, Le De magnete de Pierre de Maricourt. Traduction et commentaire, *Revue d'histoire des sciences* 28 (3), pp. 193–234, doi:10.3406/rhs.1975.1153.
- Spencer, A.J. (1979)**, The brick foundations of Late Period peripteral temples and their mythological origin, dans J. Ruffle, G. Gaballa & K. Kitchen, (éds.), *Glimpses of Ancient Egypt. Studies in Honour of H. W. Fairman*, Warminster : Aris & Philips, pp. 132–137.
- Stern, D.P. (2002)**, A millenium of geomagnetism, *Reviews of Geophysics* 40 (3), pp. 1–30, doi:10.1029/2000RG000097.

- Svoboda, J. (2006)**, Prehistory of the southern Bahariya Oasis, Western Desert, Egypt. An outline, *Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia* 28 (1), pp. 18–30, doi:10.1134/S1563011006040037.
- Svoboda, J. (2013)**, Prehistory of the Southern Bahariya : A case Study in Northeast African Settlement Archaeology, dans M. Dospěl & L. Suková, (éds.), *Bahriya Oasis. Recent Research into the Past of an Egyptian Oasis*, Charles University, Prague, pp. 35–62.
- Talwani, M. (1965)**, Computation with the help of digital computer of magnetic anomalies caused by bodies of arbitrary shape, *Geophysics* 30 (5), pp. 797–817, doi:10.1190/1.1439654.
- Talwani, M. & Heitzler, J.R. (1964)**, Computation of magnetic anomalies caused by two dimensional structures of arbitrary shape, dans G.A. Parks, (éd.), *Computers in the Mineral Industries*, School of Earth Sciences, Stanford University Publications, pp. 464–480.
- Tarantola, A. (2005)**, *Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation*, s.i.a.m, doi:10.1137/1.9780898717921.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. & Sheriff, R.E. (1990)**, *Applied Geophysics*, Cambridge University Press.
- Thébault, E., Purucker, M., Whaler, K.A., Langlais, B. & Sabaka, T.J. (2010)**, The Magnetic Field of the Earth's Lithosphere, *Space Science Review* 155 (1), pp. 95–127, doi:10.1007/s11214-010-9667-6.
- Traunecker, C. (1987)**, Les "temples hauts" de Basse époque : un aspect du fonctionnement économique des temples, *Revue d'Égyptologie* 38, pp. 147–162.
- Wuttman, M., Bousquet, B., Chauveau, M., Dils, P., Marchand, S., Schweiter, A. & Volay, L. (1996)**, Premier rapport Préliminaire des travaux sur le site de Ayn Manawir (oasis de Kharga), *Bulletin de l'Institut Français d'Archéologie Orientale* 96, pp. 385–451.

- Youssef, M.M. (2003)**, Structural setting of central and south Egypt : An overview, *Micropaleontology* 49 (Suppl. 1), pp. 1-13, doi:10.2113/49.Suppl_1.1.

Méthode magnétique multi-échelle à trois dimensions appliquée à l'étude archéologique du site de *Qasr 'Allam*, oasis de *Bahariya*, Égypte

Résumé

Cette étude propose d'examiner les vestiges archéologiques de *Qasr 'Allam* enfouis sous les sédiments en développant une approche géophysique adaptée aux contextes du site. La mesure du champ total à l'aide de magnétomètres vectoriels à vanne de flux permet la mise au point de dispositifs multi-capteurs qui permettent une acquisition au rapport rapidité/densité hautement modulable. Ainsi des cartes verticales et horizontales de l'anomalie de l'intensité du champ magnétique à différentes échelles sont établies. L'utilisation et le développement d'outils d'interprétation issus de la théorie du potentiel, couplés à des fouilles ciblées, permettent à la fois de d'obtenir des informations sur les sources et d'améliorer la méthode grâce aux preuves-terrain. Les résultats ainsi obtenus révèlent la présence d'un système d'irrigation complexe et étendu, d'un ensemble cultuel massif du 8^e/7^e siècle avant l'ère commune et d'un second ensemble plus petit postérieur de plusieurs siècles. Entre ces deux derniers un changement environnemental brutal d'un milieu humide à aride a manifestement eu lieu. Tous ces résultats permettent d'établir des cartes des vestiges pour l'étude archéologique et l'établissement d'un périmètre de protection du site.

Mots-clés

Archéologie – Géophysique – Magnétisme – Prospection magnétique – Anomalie magnétique – Méthodes potentielles

Abstract

This study proposes to investigate the archaeological remains covered by sediments in *Qasr 'Allam* by developing a geophysical method adapted to the contexts of the site. The measurement of the magnetic total field with fluxgate vectorial magnetometers allows the design of multi-captor devices which enable an acquisition of data with a highly adjustable rapidity/density ratio. Thus, vertical and horizontal maps of the anomaly of the magnetic total field's intensity are established. The use and development of interpretative tools derived from the theory of potential fields in association with targeted excavations allow the procurement of information on the sources as well as the improvement of the method through field evidences. The results reveal the existence of a large and intricate irrigation system, of a massive cultic facility dating from the 8th/7th century before the Common Era, and of a smaller complex built a few centuries later. Evidences also show that a massive change from humid to arid environmental conditions took place during the time separating the two latter. All these results allow the establishment of maps of the remains for archaeological studies and the establishment of a perimeter of protection of the site.

Keywords

Archaeology – Geophysics – Magnetism – Magnetic prospection – Magnetic anomaly – Potential field methods