HAL
open science

Magnétisme des villes circulaires du troisième millénaire avant J.C dans les marges arides de la Syrie

Rozan Alkhatib-Alkontar

To cite this version:

Rozan Alkhatib-Alkontar. Magnétisme des villes circulaires du troisième millénaire avant J.C dans les marges arides de la Syrie. Géophysique [physics.geo-ph]. Université de Strasbourg, 2015. Français. NNT : 2015STRAH022 . tel-01428810

HAL Id: tel-01428810

https://theses.hal.science/tel-01428810

Submitted on 6 Jan 2017

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.

UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

ÉCOLE DOCTORALE ***Sciences de la terre et Environnement ED 413***

UMR7516 Institut de Physique du Globe de Strasbourg

THÈSE présentée par :

Rozan ALKHATIB ALKONTAR

Soutenue le : **04 septembre 2015**

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

Discipline/ Spécialité : Géophysique

Magnétisme des villes circulaires du troisième millénaire avant J.C dans les marges arides de la Syrie

THÈSE dirigée par :

M. MUNSCHY Marc	Physicien du globe, Institut de Physique du Globe de Strasbourg/EOST

RAPPORTEURS :

M. GALLET Yves	Directeur de recherche, Institut de Physique du Globe de Paris
M.THEBAULT Erwan	Chargé de recherche, Laboratoire de Planétologie et de Géodynamique, Université de Nantes

---

AUTRES MEMBRES DU JURY :

Examinateurs :

MM. JOUNIAUX Laurence	Directrice de recherches, Institut de Physique du Globe de Strasbourg/EOST

Remerciements

Au terme cette thèse je pense à tous ceux qui m'ont encouragé.

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers mon directeur de thèse, Marc Munschy, pour toute l'aide qu'il m'a apporté. Malgré les nombreuses difficultés, il a gardé confiance en moi et je lui en suis reconnaissante. Un immense merci pour ses qualités humaines, son investissement, sa gentillesse et sa simplicité, pour avoir été là dans tous les moments d'errance, sans lui rien ne se serait fait. Je le remercie également pour la qualité de son encadrement ainsi pour ses précieux conseils et sa grande disponibilité, ses encouragements et pour son soutien indéfectible qui m'a accompagné tout au long de ses années. Je suis honorée d'avoir travaillé sous sa direction.

Ce travail n'aurait pas pu être possible sans la participation des personnes rencontrées lors de mon travail sur le terrain, en tout particulier Philipe Quenet et Corinne Castel qui m'ont offert de nombreuses opportunités de collaborations et d'échanges scientifiques. Merci infiniment d'avoir accepté de prendre part au jury de la thèse.

Je remercie vivement aussi Yves Gallet, Erwan Thebaul et Laurence Jouniaux d'avoir accepté de siéger au jury. Grâce à leurs critiques et conseils, ce travail s'est considérablement enrichi.

Je tiens à remercier les doctorants qui m'ont épaulé et accompagné tout au long des années de thèse, et notamment Simon, Emilie, Bruno, Pauline et Jeanne pour nos longues conversations, votre soutien moral, votre écoute, votre bonne humeur et l'ambiance très sympathique qui m'ont offert un cadre de travail idéal. J'ai vraiment apprécié travailler à vos côtés et je vous souhaite tous la réussite. Je voudrais remercier aussi les personnes de l'Eost qui m'ont aidé, la liste serait beaucoup trop longue, mais ils ont chacun à leur manière fait partie de cette histoire.

Je remercie aussi mes amis, particulièrement ceux qui sont à Strasbourg, pour avoir partagé avec moi plein de super moments et pas mal de délire, Ahmad, Chaikhmous, hiba, Iman, Ilham et Abeer, … de près ou loin vous m'avez toutes et tous apporté quelque chose, merci. Je souhaite remercier Cassandre, ma partenaire de cinéma, Marion, Isabelle et Joëlle pour toute l'aide et leur grande gentillesse.

J’aimerais remercier mes amies proches Alexandra et Alice et leurs parents qui sont comme ma famille en France, avec eux j’ai découvert une nouvelle culture, des nouvelles villes et nouvelles expériences.

Mon ami fidèle Saddam Shkair je ne sais pas comment te remercier pour les nombreux sacrifices, ton amitié et pour les échanges au quotidien, pour ta patience et ta compréhension de mes moments difficiles, pour m’avoir toujours poussé (et surtout supporté !). Merci d’avoir été là et de toujours l’être.

Enfin, Je remercie du fond du cœur ma famille, j’adresse ici une pensée particulière à mes parents, mon père Saado et ma mère Noura. Mes affectueuses pensées vont également à mes frères Talal, Kinan, Issam, Yazan et Ammar et mes sœurs Roula et Rawaa. Merci pour tout l’amour que l’on se porte et de m’avoir donné le gout de l’effort, pour votre soutien inconditionnel et vos encouragement durant ma thèse, mais aussi tout au long de mes études, je ne vous en serais jamais assez reconnaissant.

Table de métiers

Remerciements 3

Table de matières 5

Introduction 11

Chapitre1: utilisation des méthodes géophysiques pour l'archéologique et principes de la méthode magnétique 16

Chapitre1: utilisation des méthodes géophysiques pour l'archéologique et principes de la méthode magnétique 18

1. Utilisation des méthodes géophysiques pour la prospection archéologique 18

1.1. Contexte historique de l'utilisation la prospection géophysique pour l'archéologie 18

1.2. Les méthodes géophysiques utilisées pour la prospection archéologique 20

1.2.1. La méthode électrique 20

1.2.2. Le Géoradar (GPR) 22

1.2.3. La microgravimétrie 24

1.2.4. La méthode magnétique 27

2. Principe de la méthode magnétique 28

2.1. Le champ magnétique terrestre 30

2.2. Les modèle globaux de champ magnétique IGRF 31

2.3. Les variations temporelles 34

2.3.1. Les variations diurnes 34

2.3.2. Les variations séculaires 34

2.4. Les propriétés magnétiques des matériaux de la croûte terrestre 34

2.4.1. La susceptibilité magnétique 34

2.4.1.i. Les matériaux diamagnétiques 35

2.4.1.ii. Les matériaux paramagnétiques 35

2.4.1.iii. Les matériaux ferromagnétiques 35

2.4.2. Les minéraux magnétique naturels 36

2.4.2.i. La magnétite 36
2.4.2.ii. La maghémite 37
2.4.2.iii. La greigite 37
2.4.2.iv. L'hématite 37
2.4.3. L'aimantation 37
2.4.3.i. L'aimantation induite 38
2.4.3.ii. L'aimantation rémanente 38
2.4.3.iii. L'aimantation rémanente isotherme (ARI) 38
2.4.3.iv. L'aimantation thermorémanente(ATR) 38
2.4.3.v. L'aimantation thermorémanente partielle(ATRp) 39
2.4.3.vi. L'aimantation rémanente visqueuse (ARV) 39
2.4.3.vii. L'aimantation rémanent détritique ou dépôt (ARD) 39
2.4.3.viii. L'aimantation rémanente chimique (ARC) 39
2.5. Les appareils de mesure magnétique 40
2.5.1. Les magnétomètres scalaires 40
2.5.1.i. Le magnétomètre à protons 40
2.5.1.ii. Le magnétomètre à pompage optique 41
2.5.2. Les magnétomètres à vanne de flux 41
Chapitre2: synthèse des contextes archéologiques et magnétiques 45
Chapitre2: synthèse des contextes archéologiques et magnétiques 47
3. Introduction 47
3.1. Contexte général 47
3.2. Age du Bronze dans le Moyen-Orient 48
3.3. État des connaissances sur les villes circulaires en Syrie 51
3.4. Quelques éléments de l'histoire de la recherche portant sur les villes circulaires de Syrie 53
4. Les villes circulaires en Syrie 54
4.1. Tell Khuera 54
4.2. Tell Beydar / Nabada 56
4.3. Le West Jazireh Survey et Mari 58

5. Les sites faisant l'objet des cartographies magnétiques 60
5.1. Tell Al-Rawda 60
5.1.1. Localisation du site 60
5.1.2. Le milieu géographique et climatique 62
5.1.3. Contexte archéologique 63
5.1.3.i. Secteur 1 : complexe religieux au nord-est du site 66
5.1.3.ii. Secteur 2a : le rempart à l'ouest 69
5.1.3.iii. Le secteur 2b: la porte nord de la ville 69
5.1.3.iv. Le Secteur 2C 70
5.1.3.v. Le secteur 4 : sud-ouest du site, quartier d'habitation 72
5.1.3.vi. Le secteur5 74
I.5.1.3.vi.1 Le bâtiment C51 75
I.5.1.3.vi.2 Le bâtiment C50 75
5.1.3.vii. Le secteur 6 un carrefour au nord-ouest de la ville 76
I.5.1.3.vii.1 Niveau 1 77
I.5.1.3.vii.2 Niveau 2 77
I.5.1.3.vii.3 Niveau 3 77
5.1.4. L'étude céramologique 78
5.1.4.i. Matériaux 79
5.1.4.ii. Morphologie 79
5.1.4.iii. Datation 79
5.2. Tell Sh'airat 79
5.2.1. Localisation du site 79
5.2.2. Le milieu géographique et climatique 81
5.2.3. Contexte archéologique 81
5.3. Tell Malhat Ed-Deru 82
5.3.1. Localisation du site 82
5.3.2. Le milieu géographique 83
5.3.3. Contexte archéologique 86
6. Les études géophysiques 88

6.1. Tell Al-Rawda 88
6.1.1. Le réseau principal 90
6.1.2. Le réseau secondaire 91
6.1.3. L'organisation du bâti au sein du site 91
6.2. Tell Sh'airat 93
6.3. Tell Malhat Ed-Deru 94
6.4. Mari 94
7. Conclusion 96
Chapitre 3. Les cartographies magnétiques des sites : méthodes et traitement des données 99
Chapitre 3. Les cartographies magnétiques des sites : méthodes et traitement des données 101
8. Site de Tell Al-Rawda 101
8.1. Mesures magnétiques du laboratoire de Lyon 101
8.1.1. Matériel utilisé 101
8.1.2. Mise en œuvre sur le terrain et traitement des données 102
8.1.3. Traitement des données de Lyon à l'EOST 105
8.1.3.i. Les problèmes de positionnement 105
8.1.3.ii. Problèmes de festonnage et de leveling 107
8.1.3.iii. Traitements des données sur profil 110
8.1.3.iv. Inversion des capteurs bas et haut 112
8.2. Données magnétiques de l'EOST 114
8.2.1. Les systèmes de mesures magnétiques 115
8.2.1.i. La cartographie magnétique à la perche 115
8.2.1.ii. La cartographie magnétique à la luge 117
8.2.1.iii. Les capteurs magnétiques fluxgate trois composantes (Bartington) ... 119
8.2.1.iv. L'étalonnage des capteurs magnétiques 119
8.2.2. Traitement des données 120
8.2.2.i. Calibration des données magnétiques 121
8.2.2.ii. Définition des profils 122

8.2.3. Calcul des cartes magnétiques 124
8.2.3.i. Zone centrale 125
8.2.3.ii. Sud du tell 127
8.2.3.iii. Ouest du tell 129
8.2.3.iv. Cartographie magnétique à la luge 129
8.3. Compilation des données 132
9. Site de Tell Sh'airat 135
9.1. Mesures magnétiques du laboratoire de Lyon 135
9.2. Données magnétiques de l'EOST 137
9.2.1. Traitement les donnés 137
9.2.2. Cartographie magnétique de la zone centrale 138
9.2.3. Cartographie magnétique dans la ville basse 139
9.3. Compilation des données 142
10. Site de Tell Malhat Ed-Deru 144
10.1. La cartographie magnétique 144
10.2. Traitement les donnés 145
10.3. Calcul de la carte magnétique 147
11. Conclusion 152
Chapitre 4 : théorie et cas synthétiques pour l'interprétation 155
Chapitre 4 : théorie et cas synthétiques pour l'interprétation 156
12. L'anomalie de l'intensité du champ magnétique 156
12.1. Rappels théoriques 156
12.2. La modélisation de cartes magnétiques 158
13. La modélisation 161
13.1. Le modèle de barre infinie 161
13.2. Forme de l'anomalie magnétique de la barre infinie en relation avec la profondeur 164
13.3. Relation et ambiguïté avec un plaque de largeur infinie 170
14. Les opérateurs de transformation de carte 173
14.1. L'opérateur de réduction au pôle 173

14.2. L'opérateur de dérivation 179
14.3. L'opérateur de prolongement 188
14.4. Le signal analytique 194
14.5. La transformée tilt-angle 201
15. Conclusion 205
Chapitre5: interprétation des données magnétiques et modélisation 207
Chapitre5: interprétation des données magnétiques et modélisation 208
16. Application des opérateurs de transformation de cartes 208
16.1. La réduction au pôle 208
16.2. La dérivation verticale 213
16.3. Les prolongements 219
16.3.1. Prolongement vers le haut 219
16.3.2. Prolongement vers le bas 222
16.4. Le signal analytique 225
16.5. Le tilt angle 230
17. Interprétations à partir de la carte de dérivée d'ordre 1.5 233
17.1. Al-Rawda 233
17.2. Sh'airat 245
17.3. Malhat Ed-Deru 255
18. Comparaison des cartes de champ magnétique avec la gradiométrie 262
19. La modélisation 264
19.1. Modélisation de rues à Al-Rawda 264
19.2. Modalisation de fossés à Al-Rawda 269
19.3. Modélisation de rues à Sh'airat 271
20. Conclusion 271
Conclusion 275
Bibliographies 279

Introduction

Aujourd'hui, l'archéologie ne se limite pas uniquement à la reconstitution d'une histoire à partir de fouilles sur le terrain, mais elle utilise aussi de plus en plus des moyens d'exploration d'autres disciplines, en particulier de la géophysique qui a pour objet d'apporter des contraintes à la connaissance des paramètres physiques du sous-sol à partir de mesures en surface. L'avantage des méthodes géophysiques est qu'elles sont non invasives et permettent d'identifier des structures anthropiques de manière rapide et fiable. Elles nécessitent cependant une mise en place plus ou moins lourde en fonction de la méthode utilisée.

Dans les développements les plus récents, les techniques et méthodes de prospection basées sur la mesure du champ magnétique, sont particulièrement efficaces sur des sites de natures très diverses allant de la préhistoire aux époques les plus récentes. Le champ magnétique terrestre peut être comparé à celui d'un aimant au centre de la terre créé par des mouvements de convection de matière localisée dans le noyau externe. L'intensité du champ décroit en fonction de l'éloignement par rapport au centre de la terre et aux pôles magnétiques. La prospection magnétique est basée sur la mesure du champ, en général son intensité ou son gradient vertical, juste au-dessus du sol. Il est perturbé par des champs plus locaux et de plus faible amplitude produits par des aimantations dans le sous-sol. Les anomalies magnétiques que l'on en déduit sont provoquées par la présence d'aimantations induites ou rémanentes des matériaux constituant les structures archéologiques enfouies.

La méthode de prospection magnétique mise au point au laboratoire de l'EOST permet de cartographier plusieurs hectares par jour. Elle reste l'une des méthodes les plus efficaces pour visualiser les structures archéologiques enfouies. Dans notre travail, nous avons utilisé des thématiques de recherche de l'équipe « Dynamique de la lithosphère océanique et des bassins sédimentaires » de l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg qui ont pour originalité la mise en œuvre d'un dispositif de mesure complet couplant plusieurs capteurs magnétiques vectoriels trois composantes dits « fluxgate » (Munschy et al., 2007). Un des avantages de la méthode est qu'elle permet de modéliser et compenser les champs magnétiques liés au système de mesures.

En Syrie beaucoup de questions demeurent pour l'étude de l'urbanisation des « premières villes » à l'époque du Bronze (3500 à 600 av. J.C.). Ces villes sont catégorisées sous le terme commun de villes circulaires qui suivent une organisation définie par une

agglomération fortifiée bâtie selon un plan circulaire et constituée d'une « ville haute » surmontant une « ville basse » périphérique. L'objet de la thèse est la cartographie et l'interprétation de données magnétiques obtenues sur les trois sites d'Al-Rawda, Sh'airat et Malhat Ed-Deru. L'objectif est de fournir des plans précis des villes et de caractériser l'étendue et l'organisation spatiale interne du bâti, et l'amélioration des cartes déjà obtenues dans les deux sites Al-Rawda et Sh'airat par le laboratoire Archéorient (UMR5133) de Lyon. L'autre objectif est l'utilisation des outils des méthodes potentielles pour mieux comprendre l'origine des anomalies magnétiques et de proposer des modèles quantitatifs.

Les données magnétiques ont soit été acquises par Archéorient avant le début de la thèse, soit dans le cadre de mes travaux. Ce travail s'intègre dans une ANR franco-allemande avec pour participants français, l'université de Strasbourg (Philippe Quenet) et l'université de Lyon (Corine Castel).

Le mémoire est divisé en cinq chapitres.

Le premier chapitre, après une brève synthèse de l'histoire de l'utilisation de la géophysique en archéologie, donne quelques éléments de principe et d'utilisation des méthodes électriques, électromagnétiques dont géoradar et gravimétriques et se consacre principalement sur la méthode magnétique qui est celle la plus utilisée pour l'archéologie.

Le deuxième chapitre présente les trois sites archéologiques (Al-Rawda, Sh'airat et Malhat Ed-Deru), leur localisation, environnement, contexte archéologique et les résultats des travaux de fouille utiles pour l'interprétation des données magnétiques. Le premier site étudié, Al-Rawda, a été découvert lors de la prospection des marges arides conduite par Bernard Geyer dans les années 1990. Ce site possède tous les attributs d'une ville circulaire telle que la recherche archéologique en Jezireh les a définis (bâti différencié enfermé dans une enceinte circulaire, voirie radioconcentrique). Pour le Tell Al-Shairat, la première exploration est datée de l'entre-deux-guerres. Le tell est circulaire et entouré d'une enceinte sur soubassement de pierre de 600 m de diamètre. Le site de Malhat Ed-Deru contient une ville haute et une ville basse et son diamètre est de 650 m environ. Enfin, un résumé des résultats des cartographies magnétiques déjà effectuées sur deux de ces trois villes circulaires et sur le site de Mari est également présenté dans ce chapitre.

Le troisième chapitre présente l'acquisition et le traitement des données magnétiques conduisant à l'obtention de cartes magnétiques. Une partie de mon travail a consisté à traiter et interpréter les données magnétiques acquises par le laboratoire de Lyon. En effet, seule une carte de gradient vertical a été présentée alors qu'il est possible d'utiliser les données des capteurs magnétiques scalaires et ainsi pousser plus loin les traitements de données et proposer des interprétations plus quantitatives que ce qui a été publié précédemment. En 2010, on a acquis des données magnétiques en complément du travail

de cartographie fait par Archéorient sur les sites d'Al-Rawda et Sh'airat. Je montre que le système de mesure de l'EOST est plus rapide et donne des cartes magnétiques plus résolutives. Par ailleurs, on a mis en œuvre pour la première fois une cartographie magnétique à la surface du sol (10 cm) et avec une résolution horizontale de 10 cm. L'ensemble des données a été intégré de manière à obtenir une carte magnétique unique utilisée pour l'interprétation. Pour le site de Malhat Ed-Deru, la cartographie magnétique correspond à la première campagne de mesures géophysiques.

Dans le quatrième chapitre, on résume les méthodes de modélisation à deux ou trois dimensions et on présente des résultats sur la caractérisation de la profondeur de sources particulières. En particulier, pour une structure à deux dimensions de section cylindrique, on démontre que la distance entre les deux extrema principaux est proportionnelle à la profondeur et que la constante de proportionnalité dépend de la direction de l'aimantation et du champ magnétique régional. Les opérateurs de transformation de cartes sont étudiés de manière à mieux caractériser leurs propriétés pour permettre d'accentuer les limites des anomalies ou de différencier les profondeurs relatives d'où elles proviennent. Avec les anomalies brutes, on a plus de difficultés à les interpréter, même dans le cas de sources à géométrie simple, notamment à cause de leur forme différente et de leur amplitude très variable. Certaines cartes de transformée s'avèrent être des outils particulièrement précieux pour l'interprétation de la géométrie des sources dans le plan horizontal. Cette partie du chapitre présente aussi les bases théoriques des opérateurs de transformation de carte et leur application à l'identification de structures archéologiques décrites en utilisant des cas synthétiques.

Le dernier chapitre est divisé en trois parties. La première contient les résultats de l'application des opérateurs de méthodes potentielles pour les trois sites. Tous les opérateurs sont appliqués aux cartes afin de mieux caractériser les structures. Finalement c'est l'opérateur de dérivation verticale d'ordre 1,5 qui apporte le plus de résultats à l'interprétation.

Étant donné que le système de mesure d'Archéorient est constitué de deux capteurs scalaires absolus espacés verticalement de 0,8 m, il est possible de calculer des cartes de champ magnétique et d'en déduire, par un opérateur de méthodes potentielles, les gradients verticaux. J'ai donc étudié les avantages et inconvénients de l'utilisation, soit directement du gradient vertical soit de l'un ou l'autre des gradients calculés à partir des cartes magnétiques.

En troisième partie, on modélise les données soit en faisant l'hypothèse deux dimensions qui rend les calculs plus simples, soit en trois dimensions. Par exemple, en deux dimensions, on calcule la répartition des structures aimantées qui explique au mieux le champ et le gradient magnétique observés pour les rues. La modélisation à trois dimensions est plus

difficile à réaliser car on a une variable de plus. Cependant elle est généralement plus réaliste et, en particulier, à l'intersection des rues, on ne peut pas utiliser la modélisation à deux dimensions.

Enfin, on présente une comparaison des résultats entre les trois sites pour mettre en évidence les points de similitude.

Chapitre1: utilisation des méthodes géophysiques pour l'archéologique et principes de la méthode magnétique

Chapitre1: utilisation des méthodes géophysiques pour l'archéologique et principes de la méthode magnétique 3

Chapitre1: utilisation des méthodes géophysiques pour l'archéologique et principes de la méthode magnétique 18

1. Utilisation des méthodes géophysiques pour la prospection archéologique 18

1.1. Contexte historique de l'utilisation la prospection géophysique pour l'archéologie 18

1.2. Les méthodes géophysiques utilisées pour la prospection archéologique 20

1.2.1. La méthode électrique 20

1.2.2. Le Géoradar (GPR) 22

1.2.3. La microgravimétrie 24

1.2.4. La méthode magnétique 27

2. Principe de la méthode magnétique 28

2.1. Le champ magnétique terrestre 30

2.2. Les modèle globaux de champ magnétique IGRF 31

2.3. Les variations temporelles 34

2.3.1. Les variations diurnes 34

2.3.2. Les variations séculaires 34

2.4. Les propriétés magnétiques des matériaux de la croûte terrestre 34

2.4.1. La susceptibilité magnétique 34

2.4.1.i. Les matériaux diamagnétiques 35

2.4.1.ii. Les matériaux paramagnétiques 35

2.4.1.iii. Les matériaux ferromagnétiques 35

2.4.2. Les minéraux magnétique naturels 36

2.4.2.i. La magnétite 36

2.4.2.ii. La maghémite 37

2.4.2.iii. La greigite 37

2.4.2.iv. L'hématite 37
2.4.3. L'aimantation 37
2.4.3.i. L'aimantation induite 38
2.4.3.ii. L'aimantation rémanente 38
2.4.3.iii. L'aimantation rémanente isotherme (ARI) 38
2.4.3.iv. L'aimantation thermorémanente(ATR) 38
2.4.3.v. L'aimantation thermorémanente partielle(ATRp) 39
2.4.3.vi. L'aimantation rémanente visqueuse (ARV) 39
2.4.3.vii. L'aimantation rémanent détritique ou dépôt (ARD) 39
2.4.3.viii. L'aimantation rémanente chimique (ARC) 39
2.5. Les appareils de mesure magnétique 40
2.5.1. Les magnétomètres scalaires 40
2.5.1.i. Le magnétomètre à protons 40
2.5.1.ii. Le magnétomètre à pompage optique 41
2.5.2. Les magnétomètres à vanne de flux 41

Chapitre1: utilisation des méthodes géophysiques pour l'archéologique et principes de la méthode magnétique

Dans ce chapitre je fais un résumé de l'utilisation des méthodes géophysiques appliquées à l'archéologique. Je décris les avantages et les inconvénients pour cette application et j'insiste plus particulièrement sur la méthode magnétique qui fait l'objet de ma thèse et qui est la méthode la plus fréquemment utilisée en archéologie.

1. Utilisation des méthodes géophysiques pour la prospection archéologique

Aujourd'hui, le travail de terrain en archéologie prend en compte plusieurs méthodes qui ne relèvent pas de l'archéologie (imagerie, topographie, pédologie, sédimentologie, géophysique,…). Parmi les méthodes d'exploration du sous-sol qui ont pu être mises au point pour répondre aux nouvelles exigences de la recherche archéologique, la géophysique offre un très large domaine d'application à l'étude du sous-sol, aussi bien intensive qu'extensive, de gisements enfouis. Plusieurs outils géophysiques peuvent être utilisés ensemble ou séparément pour détecter et caractériser les structures archéologiques. En présence de vestiges souterrains, leurs propriétés physiques ne sont généralement pas les mêmes que celles de l'encaissant et les mesures physiques depuis la surface ont pour but de détecter et caractériser ces propriétés physiques ou leurs différences par rapport à l'encaissant (Burnez et Hesse, 1967; Hesse et al., 1997; Jones, 2008; Di Fiore et Chianese, 2008).

1.1. Contexte historique de l'utilisation la prospection géophysique pour l'archéologie

Le Laboratoire de recherche en archéologie et histoire de l'art à l'Université d'Oxford a probablement été le premier établissement à inventer l'expression «archéométrie» dans une tentative de décrire l'application de la physique pour aider à résoudre les problèmes archéologiques. Selon Linford (2006), la première utilisation moderne de la géophysique a eu lieu en 1938 sur le site de l'église paroissiale de Bruton à Williamsburg, Virginie, USA pour lequel une voute enterrée était recherchée. En 1946 Atkinson a mené la première étude géophysique archéologique en Grande-Bretagne pour mesurer la résistance de la terre sur le site d'un monument néolithique près de Dorchester-on-Thames (Bevan, 1983; Kvamme, 2003).

Ensuite, différentes techniques ont été développées selon les avancées de la géophysique. D'autres techniques utiles pour l'archéologie ont également progressé comme l'analyse de la photographie aérienne et l'utilisation des systèmes d'information géographique (Leopold et al., 2010).

En France, dans les années 1960, une campagne géophysique était menée par Claude Burnez et Albert Hesse sur des sites archéologiques de Charente. La prospection consistait en une série de profils de résistivité apparente sur un front de fouille d'une villa gallo-romaine dans laquelle apparaissaient quelques vestiges de murs. Les résultats de l'interprétation ont été représentés aussi complètement que possible et suggèrent l'existence de nombreux fossés et de quelques structures limitées. Un sondage a été fait après cette prospection et confirme un des fossés remarqués dans la carte de résistivité (Burnez et Hesse, 1967).

Dans les années 70, pour certains sites, les méthodes géophysiques précédaient les travaux de fouille, comme sur le site d'Argentomagus (Indre) en 1972. C'est le cas aussi pour le site de Saint-Romain-en-Gal où le préfet de Région fit procéder à une prospection géophysique complète du site avant de décider des aménagements à y réaliser (Simon, 2012).

Beaucoup de changements très importants ont commencé à se produire avec les progrès de la technologie et de la méthodologie à partir de l'année 1980. La première amélioration a été d'obtenir une plus grande sensibilité de l'instrumentation grâce aux progrès de l'électronique en particulier. Cela a permis de mettre en évidence des variations plus subtiles des mesures physiques et donc d'améliorer la détection de variations dans le sous-sol. L'autre amélioration est l'augmentation importante de la vitesse de mesure, avec des taux de 50 à 100 fois selon les instruments. Par exemple, en magnétisme, les mesures initiales étaient faites en « stop and go » avec des magnétomètres à protons dont la durée d'une mesure était d'une dizaine de seconde. L'apparition de nouveaux magnétomètres a permis de faire les mesures en mouvement avec des cadences meilleures qu'une mesure par seconde. Les ordinateurs ont progressivement eu de meilleures capacités mémoire et des microprocesseurs plus rapides qui ont progressivement supprimé les enregistrements manuels lents et source d'erreurs dans le report des nombres. Ces progrès ont profondément modifié les pratiques et les conduites des opérations. Dans certains cas, les archéologues ont même été conduits à repenser leur organisation au vu des résultats pouvant être amenés par la géophysique (Kvamme, 2003).

1.2. Les méthodes géophysiques utilisées pour la prospection archéologique

Les méthodes les plus couramment utilisées pour la prospection archéologique sont la méthode électrique, le géoradar en électromagnétisme et la méthode magnétique. Quelques opérations ont été menées en gravimétrie.

1.2.1. La méthode électrique

Progressivement, la résistivité électrique a été plus largement utilisée en cartographie et tomographie. Cette méthode est basée sur la mesure de l'intensité d'un courant électrique continu dans le sous-sol due à l'injection d'un courant. Ce courant est créé par l'intermédiaire d'une paire d'électrodes ponctuelles (Noel et Xu, 1991) et le courant dans le sous-sol est mesuré sur une autre paire d'électrodes. La méthode a été imaginée en 1912 par les frères Schlumberger. La résistivité électrique du sous-sol est donnée par la loi d'Ohm

$$R = \frac{V}{I} \tag{1}$$

Où I est l'intensité du courant électrique aux bornes des électrodes d'injection de courant et V est la différence de potentiel aux électrodes de mesure. Etant donné que le courant à l'injection ne correspond pas à celui de la mesure, la loi d'Ohm d'un dispositif électrique simple doit être généralisée de manière à prendre en compte la géométrie. La résistance en ohms devient une résistivité en ohms mètres et selon la répartition des électrodes un coefficient géométrique apparait. Les configurations des électrodes les plus couramment utilisées sont

Wenner $\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$ (Figure 1.1a)

Schlumberger $\rho_a = \frac{\pi L^2}{2l} \frac{\Delta V}{I}$ Avec $L \geq 5l$ (Figure 1.1b)

Dipôle-Dipôle $\rho_a = \pi a n(n+1)(n+2) \frac{\Delta V}{I}$ (Figure 1.1c)

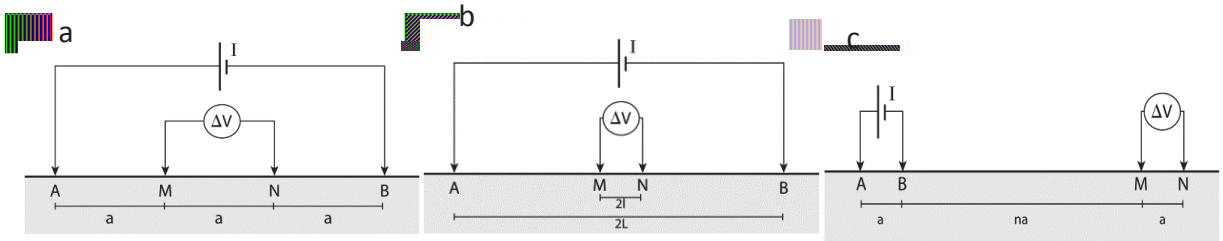


Figure 1.1 ***configuration des électrodes pour les dispositifs wenner (a), schlumberger (b) et dipôle-dipôle (c)***

La configuration dipôle-dipôle en prospection archéologique est la plus sensible aux variations latérales de résistivité, mais elle a aussi un plus mauvais niveau de signal sur bruit. La configuration Wenner a un bon rapport signal à bruit et une bonne détermination de la profondeur mais sa résolution spatiale est moins bonne (Zhou et Dahlin, 2003; Dahlin et Zhou, 2004)

Les méthodes de résistivité électrique sont très sensibles aux contrastes de sub-surface et dépendent fortement de roches en surface très résistantes (pierre, brique, fondations, sols). A l'extrème si la résistivité de surface est très importante, il n'y a plus assez de courant électrique en profondeur pour avoir des mesures exploitables. Les sédiments humides de remplissage de fossés présentent généralement une faible résistivité et conduisent donc bien le courant électrique, mais avec un faible compactage et une porosité élevée comme dans un dépotoir, on peut avoir des résistivités très élevées (Kvamme, 2003). La méthode est généralement performante pour établir la profondeur. Par exemple une nécropole médiévale en Provence (France) a été systématiquement étudiée en utilisant la prospection magnétique et la résistivité électrique. Alors que les levés magnétiques ont permis de localiser un mur et des sépultures ou crémations, la résistivité électrique a donné des informations sur leurs profondeurs.

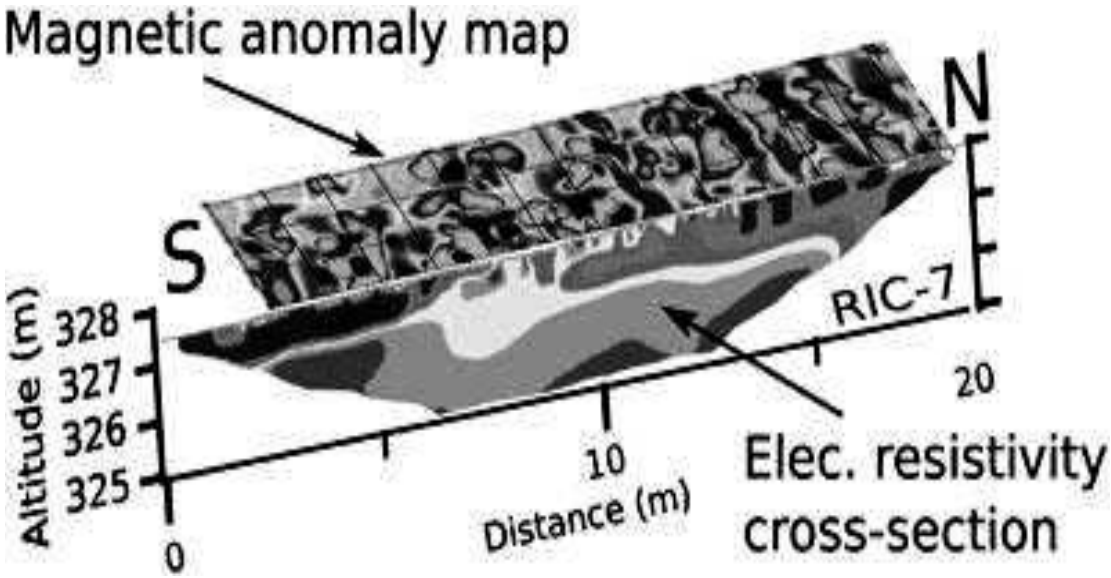


Figure 1.2 ***corrélation entre la résistivité électrique et une carte d'anomalie magnétique (Quesnel et al. 2011).***

Cependant, la résistivité électrique présente des limitations. Des erreurs systématiques peuvent dues à un mauvais contact des électrodes, c'est le cas dans des conditions climatiques sèches ou sur un sol rocailleux (Shaaban et Shaaban, 2001). Le contraste de résistivité électrique n'est pas toujours suffisante pour révéler les petites hétérogénéités (Bornand et Servat, 1984). Elle est sensible aux variations de conditions d'humidité de sub-

surface ce qui est un avantage pour certaines études, mais, pour la recherche de structures enfouis les résultats peuvent être altérés par cette variabilité au cours du temps (Tabbagh et al, 2000). Enfin, la méthode est longue à mettre en œuvre et reste limitée à des études le long de profils ce qui suppose que le milieu est à deux dimensions.

1.2.2. Le Géoradar (GPR)

La méthode géoradar (Ground Penetrating Radar, GPR) a plus récemment acquis une large acceptation dans la communauté archéologique comme permettant de rapidement localiser avec précision des éléments archéologiques enterrés. Cette méthode a été particulièrement efficace dans certains sédiments et des sols entre environ 0,2 m et 5 m au-dessous de la surface du sol, où les cibles à imager sont assez grandes ou ont des propriétés physiques et chimiques notablement différentes par rapport à l'encaissant (Lambot et al, 2004; Arciniega-Ceballos et al, 2009 ; Leopold et al, 2010; Bonomo et Ratto, 2010).

Le GPR est fondé sur l'analyse des phénomènes de propagation des ondes électromagnétiques hautes fréquences (10 MHz à 2 GHz) dans le sous-sol. Le GPR, initialement de nature impulsionnelle, est fondé sur l'excitation du sous-sol, à partir d'une antenne d'émission, par un train d'impulsions de durée courte (1 à 50 ns) afin de détecter, à l'aide d'une antenne de réception, les échos successifs associés aux contrastes de permittivités ou de conductivités rencontrés par les ondes électromagnétiques au cours de leur propagation (Figure 1.3) (Chamberlain et al, 2000). La profondeur de pénétration du GPR dépend de la fréquence du signal, ainsi que des propriétés électriques du substrat. La puissance de l'émetteur, la sensibilité du récepteur et les méthodes de traitement du signal numérique correspondant aux données acquises sont également des considérations importantes (El-Fouly, 2000).

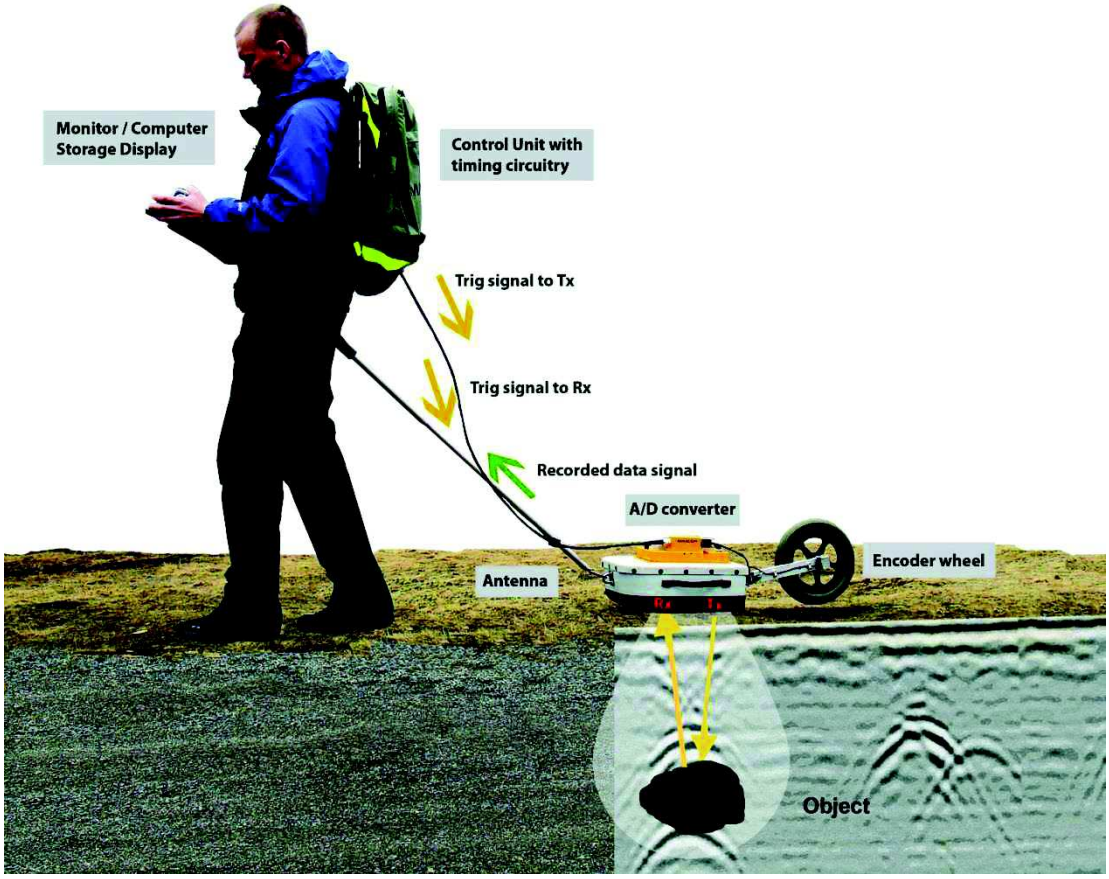


Figure 1.3 ***représentation schématique du principe de la méthode géoradar. ("MALA GPR Principle, 2015).***

La vitesse (v) des ondes électromagnétiques dans un milieu non magnétique (Davis et Annan, 1989) est

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide ($c = 3.10^8\ m.s^{-1}$) et $\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_0$ la constante diélectrique ou permittivité relative du milieu.

Le premier essai d'utilisation de radar a été effectué en Autriche en 1929 pour déterminer l'épaisseur de la glace d'un glacier. Cette recherche a montré que l'énergie électromagnétique peut être transmise dans d'autres milieux que l'air. Cependant, la première application à grande échelle du radar eu lieu pendant la Seconde Guerre mondiale, par les Britanniques, et plus tard, les Américains, cela pour détecter les réflexions d'impulsions radar des avions dans le ciel (Conyers et Goodman, 1997).

Rapidement, les archéologues ont utilisé le GPR pour localiser et cartographier les vestiges archéologiques enfouis et les couches de sédiments et sols associés. L'une des premières applications à l'archéologie a été menée à Chaco Canyon, au Nouveau-Mexique

où se trouvait un mur enterré à des profondeurs d'environ 1 m. Le toit du mur a été imagé. Ces études rudimentaires à Chaco Canyon ont été bientôt suivies par un certain nombre d'applications en archéologie dans lequel le GPR a été utilisé avec succès(Linford, 2006).

Au nord de l'Italie, Francese et al. (2009) ont utilisé cette méthode pour cartographier une villa romaine (Figure 1.4), la carte GPR de la villa a été comparée avec le plan des fondations, les deux bâtiments apparaissent étonnamment semblables.

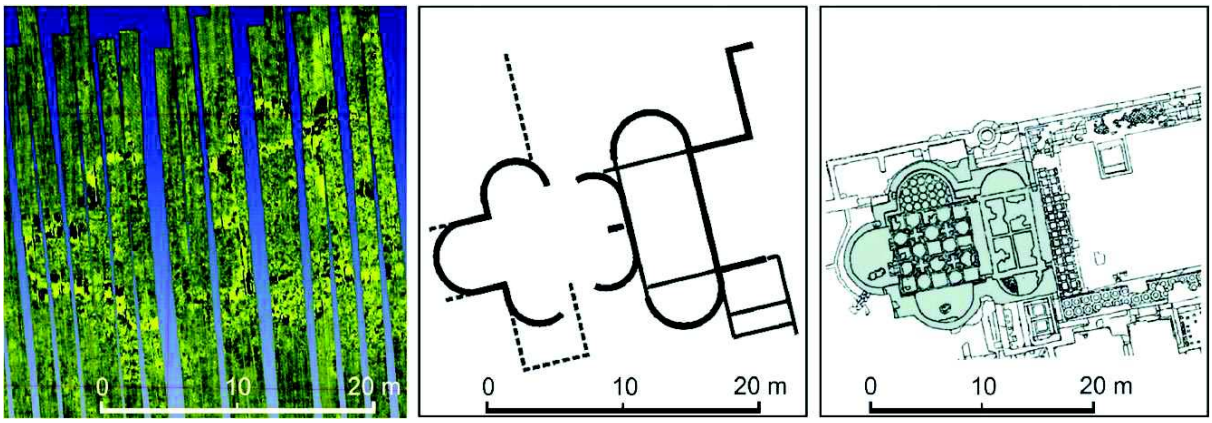


Figure 1.4 ***carte géoradar d'une villa romaine au nord de l'Italie à gauche et les plans des fondations au centre et à droite.***

Par contre il y a des limitations à cette méthode, la principale étant la profondeur d'investigation. Si les objets sont enterrés à plus de 2-3 m, il est nécessaire d'utiliser des antennes basses fréquences (300 MHz ou moins) ce qui va diminuer la résolution. Les propriétés physiques et chimiques du milieu peuvent aussi être telles que la conductivité est forte et que la pénétration est mauvaise. Par exemple, un sol à contenu électrolytique fort (riche en sels ou carbonates) atténue l'énergie des ondes GPR très rapidement ce qui rend les données GPR inutilisables (Basile et al. 2000). Si le sol est très fortement conducteur cela conduit à limiter la qualité des mesures voire à rendre la pénétration nulle (Abbas et al. 2005). La difficulté est de savoir à l'avance si les conditions de conductivité sol sont acceptables. Par ailleurs, l'application du GPR nécessite des réseaux denses de profils et souvent dans les deux directions orthogonales ce qui prend beaucoup de temps pour de grandes surfaces (Francese et al, 2009). L'humidité du sol aussi peut perturber la propagation des ondes. Dans le cas de fortes pluies ou en zones irriguées, les ondes radar peuvent se réfléchir avec une bonne part de l'énergie à la surface de l'eau, ce qui complique l'exploitation des données (Conyers et Goodman, 1997).

1.2.3. La microgravimétrie

La gravimétrie est la méthode géophysique qui cherche à déterminer les variations du champ de gravité en différents points de la surface du sol. Le champ de gravité terrestre est

un champ global existant naturellement qui attire les masses vers le centre de la terre, Avec la théorie du potentiel on montre que l'effet d'une sphère est le même que celui d'un point au centre de la sphère et de masse égale à celle-ci. Le champ gravimétrique produit à l'extérieur de la sphère est

$$\vec{g} = -G\frac{\frac{4}{3}\pi a^3 \rho}{r^3}\vec{r} \qquad (2)$$

avec G=6,67384 x 10^{-11} $m^3kg^{-1}s^{-2}$ la constante universelle de la gravitation, a, le rayon de la sphère,ρ est la densité,et $\vec{r}$ le vecteur allant du centre de la sphère au point où est obtenu le champ gravimétrique.

Les mesures gravimétriques ont été utilisées dans les recherches à grandes d'échelles telles que les études tectoniques et dans l'ingénierie et les problèmes d'environnementaux. Cette méthode peut également être appliquée à des échelles beaucoup plus petites en utilisant une grille très dense et en faisant des mesures très précises. Dans ce cas, on parle le plus souvent de microgravimétrie. Sous certaines conditions, cette méthode devient sensible à différents types de structures et d'objets enfouis, les variations de profondeur du substrat, l'épaisseur des dépôts de remplissage et les hétérogénéités géologiques.

Le premier utilisateur de la microgravimétrie pour l'application archéologique a été rapporté par Linnington (1966) à la suite d'une étude menée sur les nécropoles étrusques de Cerveteri en Italie, en septembre 1964. Malheureusement, en raison d'un instrument défectueux, les résultats de cette étude n'ont pas été concluants. Cependant, grâce à des observations faites par Linnington après cette tentative, plusieurs recherches archéologiques ont utilisé la microgravimétrie. Par exemple, la recherche faite par Batayneh (2007) en combinant la microgravimétrie avec d'autres méthodes géophysiques sur le site archéologique de Ummer-Rasas en Jordanie pour identifier un sol en mosaïque et essayer de localiser d'autres structures enterrées. La carte des anomalies gravimétriques présente une zone de haute densité et indique la présence de fondations de construction (Figure1 .5) (Batayneh et al, 2007).

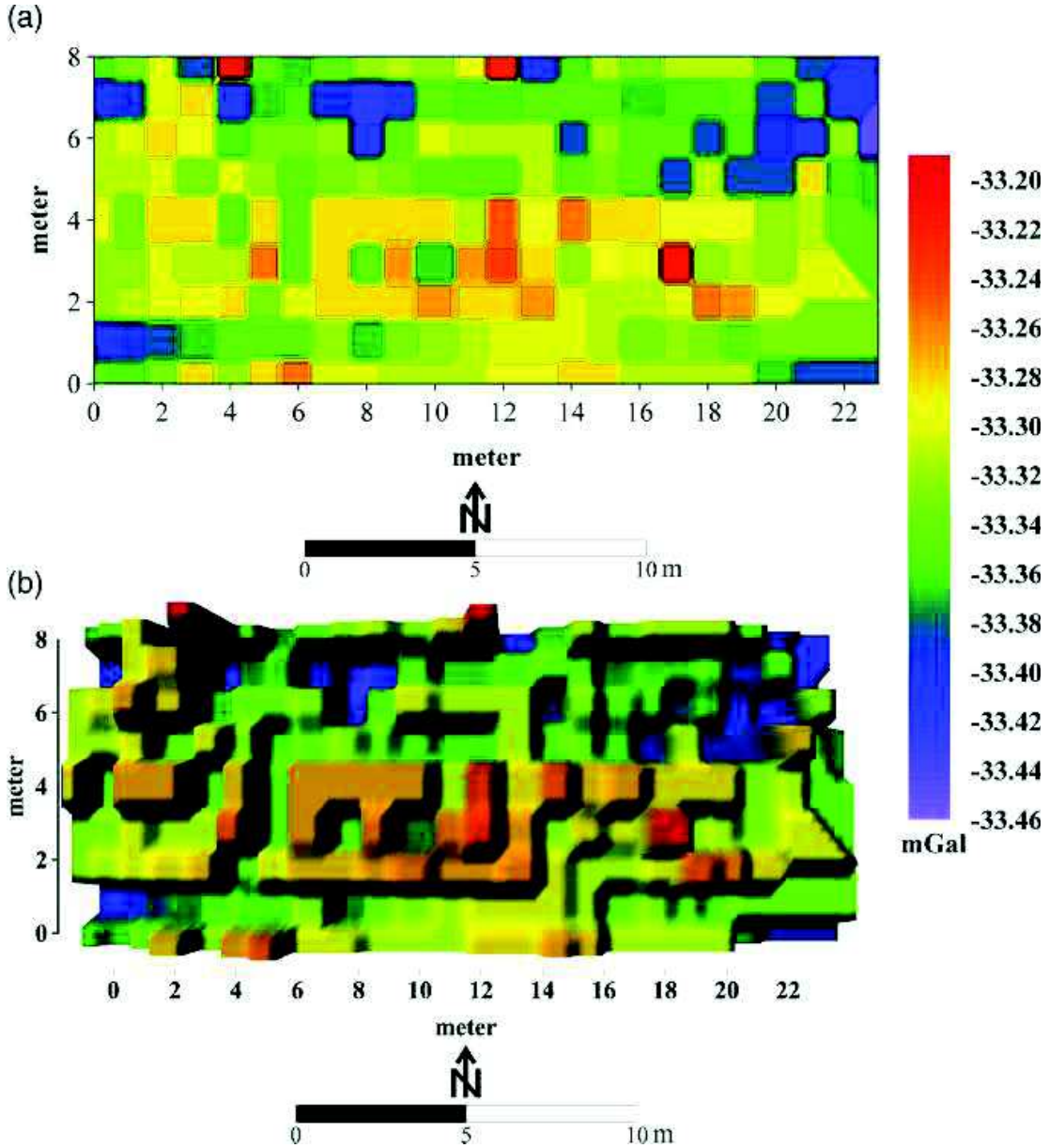


Figure 1.5 ***(a) carte des anomalies gravimétriques de Bouguer et représentation en trois dimensions.***

La microgravimétrie a cependant une utilisation limitée, principalement en raison du temps énorme nécessaire pour faire les mesures. Une mesure unique déterminée avec une bonne précision, prend rarement moins de 5 mn. Par ailleurs, le champ gravimétrique varie verticalement de 3 μgal par centimètre à la surface de la Terre et il faut donc déterminer précisément l'altitude des points de mesure si on veut des cartes d'anomalie de Bouguer précises. Aussi avant de commencer une campagne de mesures gravimétriques, des calculs de modélisation sont généralement pratiqués afin de déterminer si la cible recherchée peut être détectée par cette méthode. Il est difficile actuellement d'avoir des précisions de mesure meilleures que 10 μgal et les résultats de la modélisation montre souvent que l'amplitude attendue des anomalies ne dépasse pas quelques dizaines de microgals. D'autre

part, le traitement des mesures doit prennent en compte de nombreux effets perturbateurs qui sont sans rapport avec les objectifs recherchés, en particulier, la latitude, l'altitude et la topographie détaillée pas uniquement aux points de mesure. Ces effets doivent être modélisés et corrigés avant que les données gravimétriques puissent être exploitées. Dans les environnements urbains et industriels, il est également nécessaire de corriger les anomalies de l'effet des constructions, sous-sols et des infrastructures présentes sur le site (Debeglia et Dupont, 2002).

1.2.4. La méthode magnétique

La méthode magnétique est devenue la méthode la plus largement utilisée parmi des méthodes géophysiques pour les recherches en archéologiques. C'est une méthode qui répond particulièrement bien à l'identification de d'enregistrements de restes d'intérêt archéologique, car les variétés des processus naturels liés à la présence de ces restes génèrent des anomalies magnétiques mesurables à partir de la surface. En outre, le taux d'acquisition de données est rapide et les appareils actuels permettent de prospecter des grandes zones en des temps relativement raisonnables tout en conservant une bonne précision de mesure (Stephen et al., 2000; Arciniega-Ceballos et al., 2009). Cette combinaison de la couverture de grandes surfaces tout en ayant une bonne résolution spatiale dépasse les capacités des autres méthodes de prospection géophysique du sous-sol.

Les premières recherches archéologiques utilisant les mesures magnétiques ont eu lieu à la fin des années 1950, durant lesquelles on découvrit des fours de céramique. De ces mesures on a pu obtenir la direction du champ magnétique terrestre au moment de l'utilisation des fours. Ces premières mesures ont été réalisées avec un magnétomètre à protons par Belshe (1957). Il a été suivi par Aitken, Webster et Rees (1958) et bientôt le groupe de l'Université d'Oxford. Par la suite, des groupes se sont développés en Allemagne (Scollar, 1961), Italie (Lerici, 1961; Linington, 1964) et France (Hesse, 1962) (Weymouth et Huggisn, 1986).

Généralement le choix des zones à prospecter en magnétisme pour l'archéologique se base sur les interprétations des photos aériennes et de la télédétection. Des cercles, des ellipses, des carrés, des rectangles et des lignes droites sur ces images qui sont généralement d'origine humaine guident les zones de prospection. Les mesures magnétiques sur des petites zones révèlent le plus souvent des caractéristiques plus précises et donnent les informations demandées par les archéologues. Ainsi les levés magnétiques fournissent quand tout se passe bien un plan des vestiges du site avant les fouilles ou peuvent même être utilisés pour définir les fouilles comme des fenêtres permettant d'extrapoler à toute la zone les résultats obtenus sur de très petites surfaces. (Eppelbaum, 2011).

La méthode permet de cartographier des variations locales voire très locales du champ magnétique de la Terre. Il s'agit d'une méthode passive, contrairement aux méthodes électromagnétiques ou GPR, on mesure le champ naturel. L'efficacité des levés magnétiques pour la prospection l'archéologie est généralement bonne et liée à l'aimantation des dépôts ou des éléments archéologiques qui doivent posséder des aimantations différentes de celles des éléments environnants (Godio et Piro, 2005; Neubauer 2001; Sala et al, 2012).

La méthode magnétique étant la base de notre travail, elle est détaillée dans la deuxième partie de ce chapitre.

2. Principe de la méthode magnétique

Du point de vue du géomagnétisme, la terre peut être considérée comme constitué de trois enveloppes, le noyau, le manteau et la croûte (Figure 1.6).

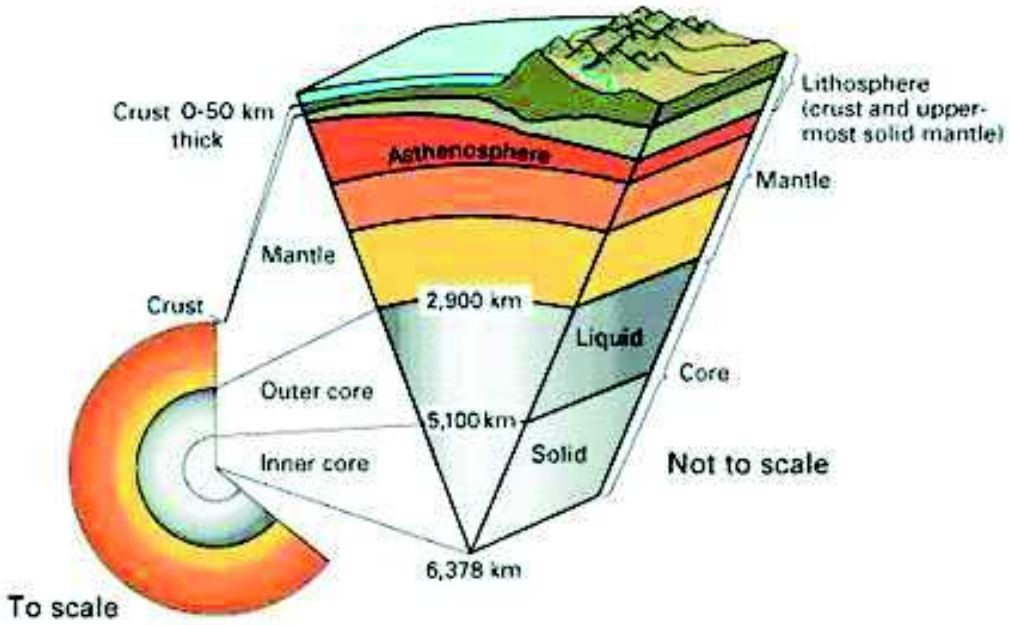


Figure 1.6 ***principales divisions de la Terre ("Inside the Earth", USGS, 2015).***

Les processus de convection dans la partie liquide du noyau de fer donnent lieu à un champ magnétique dipolaire qui s'assimile au premier ordre à celui d'un aimant au centre de la Terre et orienté selon un angle de 11,5° par rapport à l'axe de rotation de la Terre. Les lignes de champ magnétique, c'est-à-dire les lignes imaginaires qui suivent la direction du vecteur champ magnétique, vont du pôle sud vers le pôle nord (Figure1.7).

Le manteau n'intervient pas dans le magnétisme de la Terre vu ses propriétés physiques. Par contre, la croûte de la Terre est suffisamment froide, au moins sa partie supérieure, pour posséder une aimantation qui produit un champ magnétique qui interagi avec le champ

magnétique du noyau. Cependant, ce champ magnétique est faible comparé au champ magnétique du noyau.

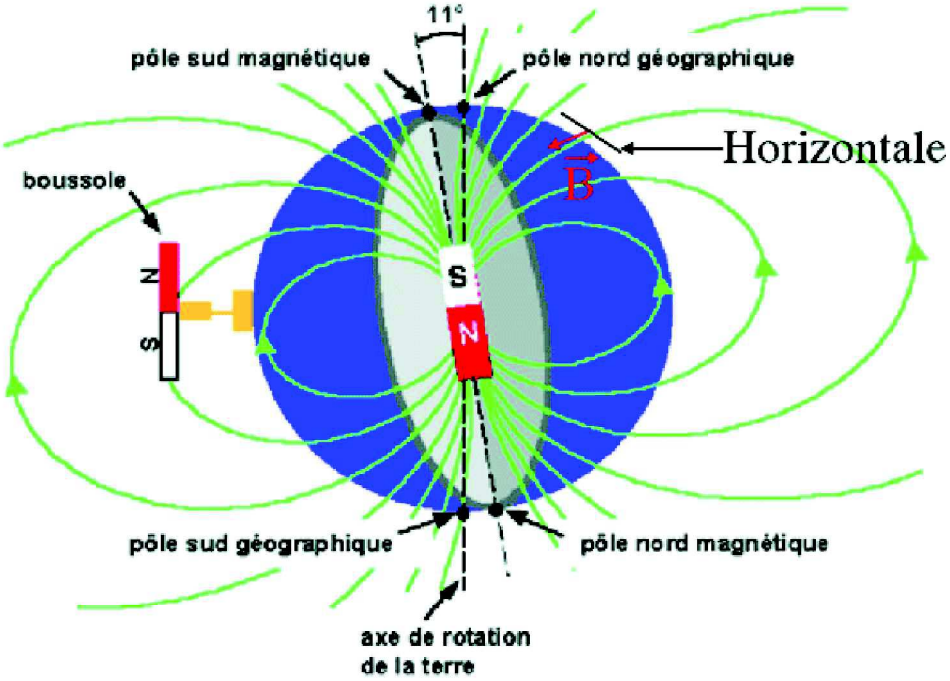


Figure 1.7 ***champ magnétique dipolaire de la Terre et lignes de champ (“Forum de Sciences Physiques : Champ Magnétique” 2015).***

Le champ magnétique, à la surface de la terre, provient principalement de la superposition de trois champs (Hinz et al, 2013).

Le champ magnétique interne, qui correspond à plus de 90% de l’intensité du champ magnétique mesuré. Ce champ est modélisé en termes de la circulation de courants électriques dans une bobine. En conséquence, les unités de mesure sont des volts-seconde par mètre carré ou Weber/m^2 ou Teslas (T). Etant donné que l’intensité du champ magnétique de la terre n'est que d'environ 5 x 10^{-5} T, l’unité communément utilisée pour les mesures en géophysique est le nanoTesla (1 nT = 10^{-9} T). Le champ magnétique terrestre a alors une valeur d'environ 50 000 nT.

Le champ magnétique issu de structures aimantées peu profondes. Il peut s’agir tout aussi bien de structures géologiques qu’archéologiques. L’intensité des anomalies dues aux sources archéologiques est très variable; elle dépasse très rarement quelques centaines de nanoteslas (objets fortement chauffés, amas ferreux).

Le champ magnétique externe à la terre qui résulte en particulier de l’interaction entre le vent solaire et le champ magnétique terrestre. Il peut varier de plusieurs dizaines de

nanoteslas sur une journée. Des variations plus rapides peuvent apparaitre en cas d'orages magnétiques.

2.1. Le champ magnétique terrestre

Dans un repère orthonormé, le champ magnétique principal peut se définir par ses trois composantes (X, Y, Z), avec Z la composante verticale positive vers le bas et $X\ et\ Y$ les composantes horizontales respectivement positives vers le Nord et vers l'Est géographique (Figure1.8)(Everett, 2013).

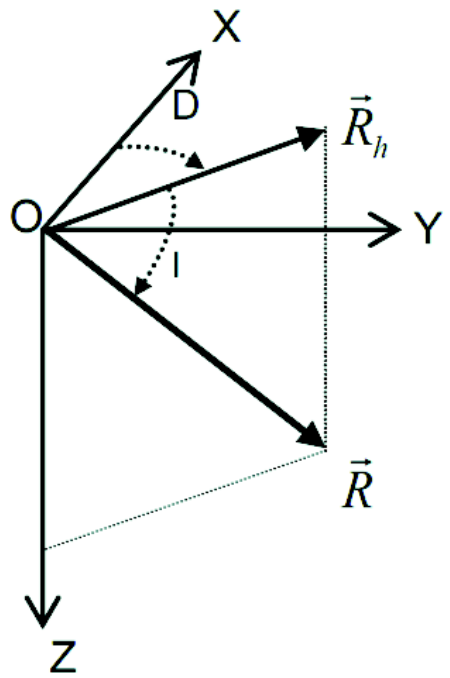


Figure 1.8 ***représentation du champ magnétique dans le repère géographique local. Les axes Ox et Oy sont respectivement orientés vers le Nord et l'Est géographique.***

On utilise aussi couramment un repère local sphérique qui permet de définir l'inclinaison et la déclinaison (Figure 1.8) et les équations de passage du repère sphérique au repère cartésien et réciproquement sont les suivantes

$$\begin{cases} X = R\cos D\cos I \\ Y = R\sin D\cos I \\ Z = RsinI \end{cases} \qquad (3)$$

$$\begin{cases} D = \ tan^{-1}(X/Y) \\ I = \ tan^{-1}(Z/\sqrt{X^2+Y^2}) \\ R = \sqrt{X^2+Y^2+Z^2} \end{cases} \quad (4)$$

Les pôles magnétiques sont observés et se déplacent au cours des temps historiques. Le mouvement est détectable d'année en année. L'intensité du champ magnétique terrestre varie aussi au cours du temps et elle est étudiée par le paléomagnétisme au travers de l'étude des paléointensités. Longtemps limitées à une période de plusieurs milliers d'années, l'étude s'étend progressivement aux temps géologiques (Kono, 1971).

2.2. Les modèle globaux de champ magnétique IGRF

Un groupe de modélisateurs du champ géomagnétique associé avec l'Association internationale de géomagnétisme et d'aéronomie (AIGA), section V examinent périodiquement les différentes représentations du champ géomagnétique à partir desquelles des modèles incluant la variation temporelle, dite variation séculaire, peuvent être calculés. A partir d'un modèle mathématique de développement en harmoniques sphériques, ils produisent un jeu de coefficients permettant de représenter le champ géomagnétique à une époque particulière. C'est l'international Geomagnetic Reference Field (IGRF)(Mandea et al., 2000; Maus et al., 2005) .

Les IGRF sont calculés avec un intervalle de 5 ans et à l'occasion de la définition du nouvel IGRF, la version précédente est validée. En 2015, la version de 2010, de l'IGRF est validée avec des corrections ou non et elle devient le Definitive Geomagnetic Reference Field, l'IGRF 2015 est défini. Des coefficients prévisionnels sont proposés pour l'année 2020, c'est le Provisional Geomagnetic Reference Field (International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Working Group V-MOD. Participating members et al., 2010).

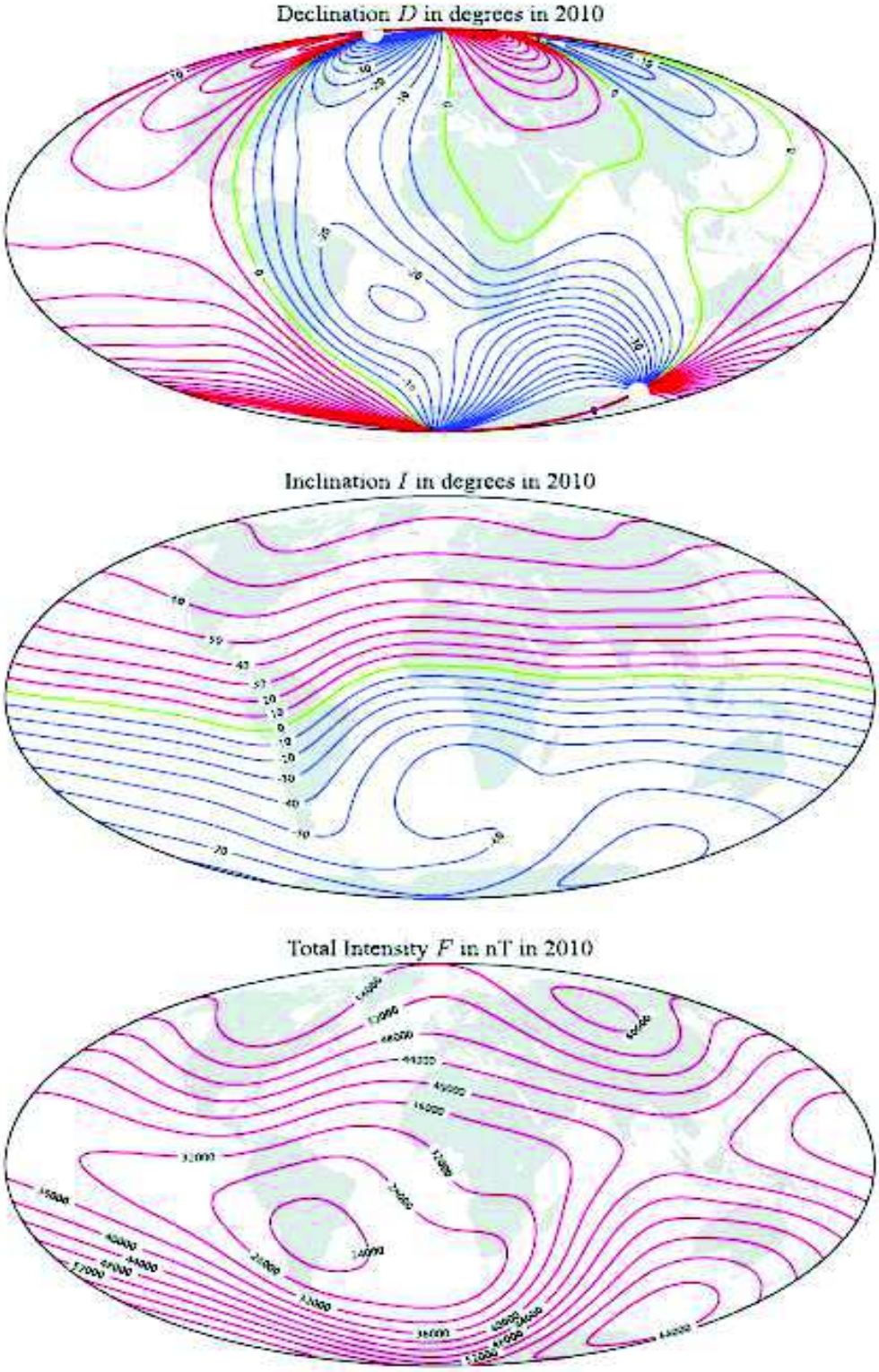
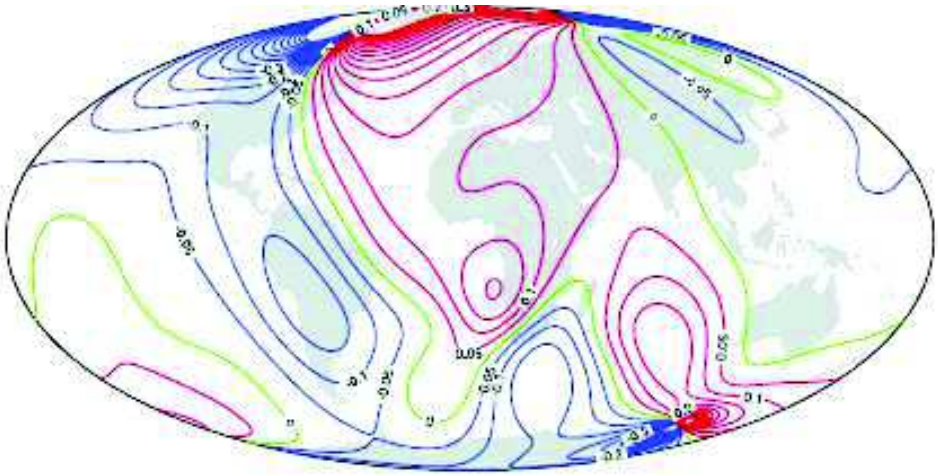
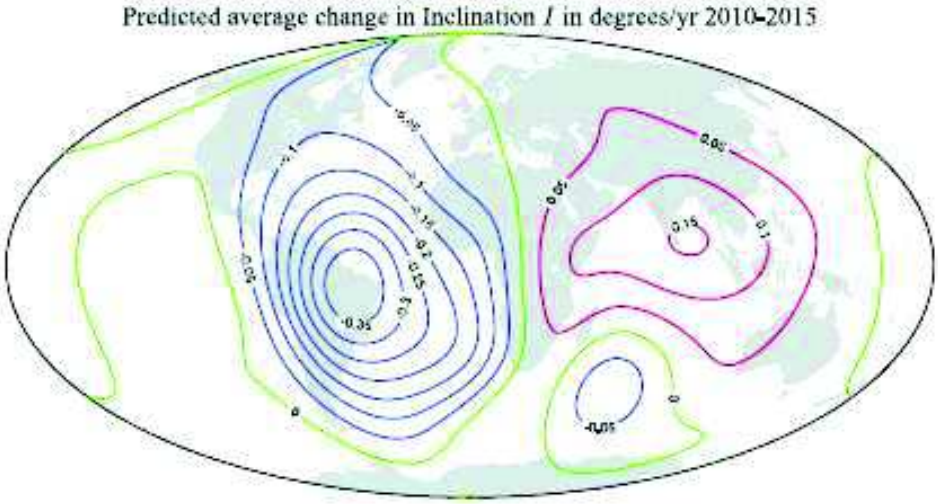


Figure 1.9 ***carte de la déclinaison D magnétique (en haut, les unités sont en degrés), l'inclinaison I (au milieu, les unités sont en degrés) et de l'intensité totale F (en bas, les unités sont en nT) à la surface de la Terre en 2010 à partir du nouveau modèle de champ géomagnétique international de référence 2010.***



Predicted average change in Inclination I in degrees/yr 2010-2015



Predicted average annual change in Total Intensity F in nT/yr 2010-2015

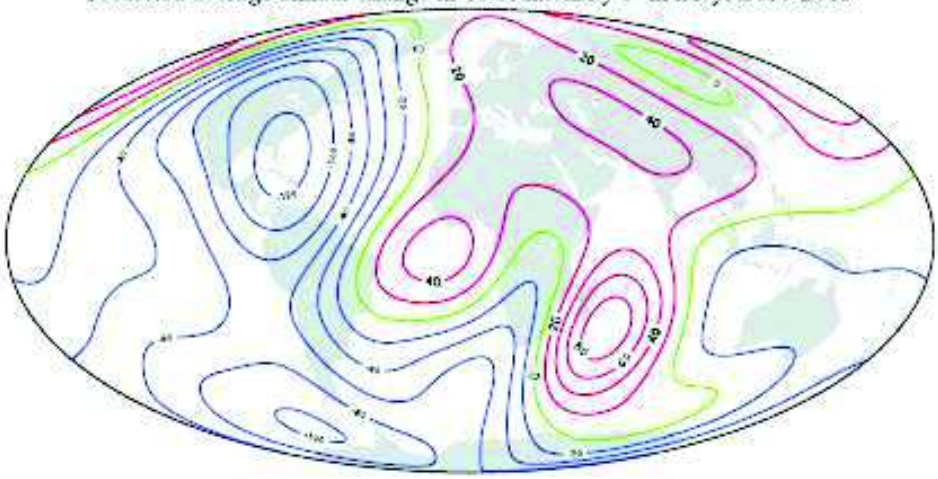


Figure 1.10 ***carte du taux prévu de variation par année de la déclinaison D (en haut, les unités sont en degrés par an), de l'inclinaison I (au milieu, les unités sont en degrés par an), et de l'intensité totale (en bas, les unités sont en nT par an) à la surface de la Terre pour l'intervalle 2010-2015.***

2.3. Les variations temporelles

Les variations du champ magnétique terrestre à l'échelle du temps allant de quelques secondes à des temps beaucoup plus longs, peuvent avoir un effet important sur les mesures magnétiques effectués en prospection (Reeves, 2005).

2.3.1. Les variations diurnes

L'origine est le rayonnement solaire électromagnétique qui produit un système de courants électriques dans l'ionosphère à environ 100 km au-dessus de la surface de la terre. Ce système s'accompagne d'un champ magnétique qui renforce ou diminue le champ terrestre permanent. L'amplitude de la variation diurne dépend de la position du soleil et de la latitude du lieu d'observation, et elle est influencée par l'activité du Soleil.

2.3.2. Les variations séculaires

Les variations séculaires correspondent à des évolutions très lentes à l'échelle humaine et peuvent s'étendre sur plusieurs siècles. Ce genre de variation est diffèrent d'un lieu à un autre. La principale manifestation de la variation séculaire donne globalement des changements dans la taille et la position d'écarts au champ dipolaire simple. La variation séculaire est observée dans les observatoires magnétiques mondiaux. Dans les autres zones, on la calcule à partir des observations nombreuses faites aux stations de répétition.

2.4. Les propriétés magnétiques des matériaux de la croûte terrestre

2.4.1. La susceptibilité magnétique

Les études de susceptibilité magnétique mesurent la facilité avec laquelle un matériau peut s'aimanter en présence d'un champ magnétique. L'objet est de caractériser les minéraux magnétiques présents dans les sédiments ce qui en fait un facteur important pour les études archéologiques (Liu et al., 2012; Wendt et al., 2013).

La susceptibilité magnétique est définie par le rapport

$$k = \frac{\vec{M}}{\vec{H}} \tag{5}$$

où k est la susceptibilité magnétique, $\vec{M}$ l'aimantation induite et $\vec{H}$ le champ magnétique inducteur.

Dalan (2008) a décrit le potentiel plus large des études de susceptibilité magnétique en archéologie. Il a montré que l'évaluation du développement des sols par des méthodes

magnétiques peut potentiellement fournir des informations sur les impacts humains (Rosendahl et al., 2014).

On classe les matériaux en fonction de leurs propriétés magnétiques, caractérisées par leur susceptibilité en trois catégories principale.

2.4.1.i. Les matériaux diamagnétiques

Ils ne contiennent aucun élément magnétique et sont caractérisés par une susceptibilité négative. En présence d'un champ magnétique inducteur externe les électrons orbitaux sont dans la direction opposée au champ inducteur. Le champ magnétique dans le corps disparaît dès que l'article est retiré du champ magnétique inducteur. Dans les matériaux diamagnétiques, le moment magnétique de l'ensemble des atomes est égal à zéro.

La plupart des corps, qu'ils soient solides, liquides ou gazeux, sont diamagnétiques. Les plus connus sont l'air, l'eau, le quartz, la calcite…

L'aimantation d'un corps diamagnétique est proportionnelle au champ magnétique appliqué, en l'absence de champ magnétique l'aimantation redevient nulle : il n'y a pas de phénomène de rémanence.

2.4.1.ii. Les matériaux paramagnétiques

Les matériaux paramagnétiques ont une très faible susceptibilité magnétique positive. En présence d'un champ magnétique externe, les électrons d'un atome sont alignés en partie parallèlement au champ inducteur. Le paramagnétisme est un phénomène qui s'explique par une compensation incomplète entre le spin (petit moment magnétique) du noyau et celui des électrons périphériques de certains ions et dépendant de la température. Cet effet de température est lié à l'agitation thermique des ions qui tend à désorganiser le parallélisme des petits moments magnétiques individuels.

Par conséquent, les électrons ont un comportement désordonné en présence d'une température élevée. L'alimentation est proportionnelle au champ magnétique appliqué, Les matériaux paramagnétiques perdent aussi leurs propriétés magnétiques en l'absence de champ magnétique externe. La plupart des minéraux contenant du fer sont paramagnétiques.

2.4.1.iii. Les matériaux ferromagnétiques

Les matériaux qui présentent un effet magnétique fort en présence ou en l'absence de champ magnétique externe sont des matériaux ferromagnétiques. Ils ont une très haute susceptibilité magnétique positive et acquièrent leur aimantation en présence d'un champ magnétique inducteur.

Le ferromagnétisme s'explique par un couplage entre les ions, suffisant pour vaincre l'effet de l'agitation thermique et rendre tout le spin parallèle. Cette explication est prouvée par le fait que si l'on chauffe un corps ferromagnétique, à partir d'une certaine température, l'agitation thermique devient supérieure aux effets du couplage magnétique : l'ordre qui existait précédemment s'effondre brutalement et le corps devient paramagnétique. On appelle cette température le point de Curie. En refroidissant ce corps, l'ordre magnétique se rétablit à cette même température et le corps devient ferromagnétique.

Les corps ferromagnétiques les plus connus sont le fer et la plupart des aciers, certains oxydes de fer (magnétite, hématite, titanomagnétiques).

Les matériaux ferromagnétiques se distinguent des minéraux antiferromagnétiques et ferrimagnétiques et ferromagnétiques par leur façon de s'aimanter. Pour les matériaux ferromagnétiques les dipôles magnétiques s'alignent rapidement parallèlement entre eux sous l'effet d'un champ magnétique externe d'aimantation.

Pour les matériaux antiferromagnétiques, les dipôles s'alignent antiparallèlement entre eux et l'aimantation résultante est plus faible. Pour les matériaux ferrimagnétiques les dipôles de sens opposés sont en quantité différente et non égale et leur aimantation résultante est aussi assez faible.

2.4.2. Les minéraux magnétique naturels

Généralement les roches sont constituées d'un assemblage de minéraux dia, para et ferromagnétiques en grains plus ou moins gros, Beaucoup d'études se sont intéressées au magnétisme des roches. Ces études ont permis d'identifier les minéraux magnétiques responsables des fortes susceptibilités magnétiques observées et les principaux processus chimiques qui conduisent à leur formation ou leur disparition.

Le magnétisme des sols est un cas particulier et Le Borgne (1955) a montré que les sols sont souvent plus aimantés que le milieu sous-jacent. Les perturbations anthropiques peuvent être importantes sur ces aimantations, par exemple l'action du feu ou des structures en creux Les deux principaux minéraux responsables de l'aimantation des sols sont la magnétite et la maghémite, toutes deux ferrimagnétiques (Benech, 2000).

2.4.2.i. La magnétite

La magnétite (Fe_3O_4) cristallise par un système cubique à face centrée de type spinel inverse. C'est un minéral contenant à la fois des ions Fe^{2+} et Fe^{3+}. Parfois, on peut le trouver assemblé à des ions du type Ti^{2+}, Al^{2+}, Mg^{2+} ou encore Mn^{2+} (Graham et Scollar, 1976). Ces formes substituées se rencontrent couramment dans les roches basiques.

Principalement, la magnétite se forme en réduction de l'hématite (αFe_2O_3) dans le sol, ou de la goethite (Fe_2O_3, H_2O), forme hydratée de l'hématite. On peut identifier la condition de

formation de la magnétite par des conditions réductrices du milieu, en relation avec la présence de matière organique.

2.4.2.ii. La maghémite

La maghémite (γFe_2O_3) est, comme la magnétite un oxyde ferrique. Sa façon de cristalliser est identique à celle de la magnétite, ce qui rend parfois difficile la distinction avec cette dernière. La différence entre ces deux minéraux se limite à leur composition ionique: la maghémite ne contient que des ions Fe^{3+} et, pour cela elle est parfois considérée comme de la magnétite entièrement substituée (Dunlop, 1973). L'aimantation de la maghémite est saturée par une aimantation inférieure à celle de la magnétite; elle est chimiquement la forme la plus oxydée des oxydes de fer et, pour cette raison, aura une influence considérable sur les propriétés magnétiques des sols bien aérés.

2.4.2.iii. La greigite

La greigite (Fe_3S_4) est aussi un minéral ferrimagnétique, de même structure que la magnétite ou la maghémite, ce minéral est connu pour se former dans les niveaux sédimentaires marins ou lacustres.

La formation de la greigite dans les sédiments peut avoir deux origines :

1) production de sulfures de fer par réduction bactérienne (Freke et Tate, 1961),

2) biominéralisation intracellulaire de cristaux de greigite par des bactéries (Mann et al., 1990).

2.4.2.iv. L'hématite

L'hématite (αFe_2O3) est un minéral antiferromagnétique, à faible ferromagnétisme au-dessus de –15°C, que l'on trouve dans les roches magmatiques alcalines (granites, rhyolites, trachytes, syénites) (Foucault et Raoult, 1988) et qui peut être très abondant dans toutes les formations d'altération. L'hématite possède une aimantation induite faible mais son aimantation rémanente est assez importante.

2.4.3. L'aimantation

Les anomalies magnétiques au sens des méthodes potentielles sont le résultat de la présence d'aimantations dans le sous-sol. Les propriétés magnétiques d'un matériau trouvent leur origine dans l'existence d'orientations régulières des moments magnétiques qui peuvent suivre le champ magnétique ou en être indépendantes. Les principaux minéraux magnétiques présents dans les espèces minéralogiques sont les oxydes de fer (magnétite Fe3O4, hématite Fe2O3, maghémite Fe2O3)(De Nayer et al., 1979; Marmet et Tabbagh, 2001).

Le moment magnétique génère dans tout l'espace un champ magnétique qui se compose avec le champ magnétique terrestre et ainsi provoque une anomalie pouvant être discernable. En conséquence l'objet de la prospection magnétique est de mesurer le champ magnétique précisément de manière à mettre en évidence les variations dues à ces aimantations.

Les deux principaux types d'aimantations que l'on caractérise en prospection magnétique des sites archéologiques sont (Hesse, 1965):

- d'une part l'aimantation thermorémanente des terres cuites qui permet la localisation et la caractérisation de fours et de foyers anciens.

- d'autre part, l'aimantation induite de structures archéologiques qui se distingue des matériaux naturels avoisinants qui sont très sous souvent peu aimantés.

2.4.3.i. L'aimantation induite

L'aimantation induite n'existe qu'en présence d'un champ excitateur (le champ magnétique terrestre). Elle est parallèle à ce champ et son intensité lui est proportionnelle. Le coefficient de proportionnalité est la susceptibilité magnétique. Les conditions de la formation du matériel aimanté caractérisent sa capacité à s'aimanter. L'apparition d'une susceptibilité supplémentaire est liée aux situations de gisement, d'aération du sol, de présence de matières organiques.

2.4.3.ii. L'aimantation rémanente

Cette aimantation est indépendante du champ magnétique environnant et correspond à une aimantation invariable. Elle enregistre le champ magnétique à l'époque de la cristallisation pour les roches ignées. L'intensité de l'aimantation rémanente d'un corps rocheux dépend de la proportion de minéraux ferromagnétiques présents, de l'intensité du champ géomagnétique qui régnait lors de l'apparition de l'aimantation rémanente et de l'évolution géologique de la roche. Mis à part les roches d'origine magmatique, son intensité est faible par rapport à celle de l'aimantation induite.

2.4.3.iii. L'aimantation rémanente isotherme (ARI)

On peut donner une aimantation à une roche si on applique un champ magnétique fort pendant un temps court, de quelques secondes ou de quelques minutes à la température ordinaire. Les courants électriques liés à un coup de foudre produisent le même type d'aimantation (Westphal, 1986).

2.4.3.iv. L'aimantation thermorémanente(ATR)

L'aimantation thermorémanente est l'aimantation qui correspond à une orientation préférentielle des aimants élémentaires. Ce type d'aimantation apparait dans des matériaux

ayant été chauffés. En particulier, certains des oxydes de fer qui entrent dans la composition chimique des matériaux terrestres ont la propriété d'acquérir une aimantation uniforme résultant de chacune des particules matérielles présentes. Si l'objet ne subit pas de nouveaux forts réchauffements, ses caractéristiques restent inchangées en fonction du temps. Pour chacun des minéraux magnétiques, il existe une température, dite de Cuire, en dessous de laquelle ils s'aimantent (Benech, 2000). Autrement dit, si l'on chauffe de l'argile au-dessus du point de Curie, à savoir 670°C pour l'hématite, toute aimantation disparaît. Elle ne réapparaîtra que pendant le refroidissement et elle aura pour particularité de posséder la même direction que celle du champ magnétique terrestre et d'avoir une intensité proportionnelle à ce même champ. Les aimants élémentaires étant alors tous dirigée dans la même direction, l'aimantation globale du matériau n'est plus nulle et même relativement importante puisque le facteur de proportionnalité est très élevé. Ce type d'aimantation a la propriété de rester constante au cours du temps si le corps ne subit pas de nouveaux réchauffements.

2.4.3.v. L'aimantation thermorémanente partielle(ATR_p)

Une roche ou une terre cuite qui se refroidit dans un champ h entre la température T1 et T2 inferieure à la température de curieT_c, acquiert une aimantation (ATR_p) plus faible que l'ATR, mais qui a des propriétés semblable. Mais la caractéristique la plus intéressante des (ATR_p) est la loi d'additivité. La somme des(ATR_p) acquise dans le même champ h entre T1 et T3. D'autre part, un réchauffement à la température T et en laissant refroidir en champ nul ne détruit que les (ATR_p) acquises à des températures inférieures à T (Westphal, 1986).

2.4.3.vi. L'aimantation rémanente visqueuse (ARV)

Un corps placé dans un champ magnétique pendant longtemps acquiert progressivement une aimantation rémanente nommée visqueuse. L'aimantation visqueuse croit lentement et n'est pas toujours négligeable (De Nayer et al., 1979).

2.4.3.vii. L'aimantation rémanent détritique ou dépôt (ARD)

Si une vase se dépose lentement au fond d'un bassin, les éléments magnétiques s'orientent parallèlement au champ magnétique et vont fossiliser ce champ. L'aimantation qui résulte est stable (Westphal, 1986).

2.4.3.viii. L'aimantation rémanente chimique (ARC)

Ce genre d'aimantation apparait dans une roche lorsque de nouveaux minéraux magnétiques se forment à partir de minéraux ou liquides paramagnétiques, les grains ferromagnétiques créés s'aimantent parallèlement au champ extérieur.

2.5. Les appareils de mesure magnétique

Il y a une longue histoire des magnétomètres conçus et construits tout d'abord sur des principes mécaniques pour mesurer la direction des champs soit dans des plans verticaux ou horizontaux ou son intensité et sa déclinaison. Les premières observations sur les aimants sont censées remonter au philosophe grec Thalès au sixième siècle avant notre ère. Les Chinois utilisaient le compas magnétique autour de l'an 1100, les Européens de l'Ouest en 1187, les Arabes en 1220. William Gilbert (1540-1603) a fait la première étude du magnétisme terrestre. Dans « De Magnete », il a montré que le champ magnétique de la terre peut être approché par le champ magnétique d'un aimant permanent se trouvant dans une direction générale nord-sud proche de l'axe de rotation de la terre.

Le développement des magnétomètres utiles pour l'exploration, c'est à dire utilisables pour effectuer un grand nombre de mesures rapidement dans une zone donnée vient du développement de l'électronique. L'invention du magnétomètre électronique a eu lieu au cours de la seconde guerre mondiale par V. Vacquier à la Gulf Research and Development Company. Il est connu sous le nom de magnétomètre « à vanne de flux » ou fluxgate en anglais et a été conçu pour détecter des sous-marins (Nabighian et al., 2005).

Actuellement il y a deux types de capteurs magnétiques qui sont utilisés pour la mesure du champ magnétique en prospection destinée à l'archéologie

- les capteurs scalaires qui mesurent directement l'intensité de champ magnétique terrestre indépendamment de son orientation,
- Les capteurs vectoriels qui produisent un signal de sortie proportionnel à l'intensité du champ magnétique dans une direction donnée.

Généralement la prospection magnétique pour les recherches archéologiques nécessite des caractéristiques supplémentaires, en particulier le capteur doit être léger et la résolution de la mesure doit être d'au moins 0,1 nT avec une cadence d'au moins 0,1 mesures à la seconde.

2.5.1. Les magnétomètres scalaires

Les mesures magnétiques effectuées par ce type d'instruments ont une précision de l'ordre de 0,01 nT et une cadence de 0,1 à 10 Hz (Munschy et Fleury, 2011).

2.5.1.i. Le magnétomètre à protons

Ce type de mesure est basé sur le phénomène de résonance magnétique nucléaire. Le moment magnétique d'un proton libre va s'aligner avec un champ magnétique ambiant. Une quantité (généralement environ un demi-litre) d'un liquide riche en protons libre tel que l'eau ou l'alcool est soumise à un fort champ magnétique continu appliqué par

l'intermédiaire d'un passage de courant à travers une bobine enroulée autour de la bouteille. Ce courant provoque l'alignement des protons dans la direction du champ magnétique ainsi créé. Lorsque le champ magnétique est coupé, les protons précessionnent à une fréquence proportionnelle à l'intensité du champ magnétique ambiant. Cette fréquence est mesurée avec un fréquencemètre simple car la fréquence est de l'ordre de quelques kilohertzs. La durée totale de la mesure est de quelques secondes. La constante de proportionnalité, le rapport gyromagnétique du proton, étant une constante absolue, les mesures de l'intensité du champ magnétique sont ainsi aussi des mesures absolues.

Les magnétomètres à proton ont été largement utilisés car absolus, peu couteux et précis. Ils ne le sont presque plus actuellement en raison de la durée de la mesure et que le liquide ne doit pas être agité pendant la mesure sous peine de fortement perturber voire d'annuler l'alignement des protons (Acuña, 2002).

2.5.1.ii. Le magnétomètre à pompage optique

En l'absence d'un champ magnétique, les électrons de valence de certains atomes (césium, potassium, rubidium) ont deux états : B état normal ou A état excité. Sous l'effet d'un champ externe, chacun des deux états se sépare en deux niveaux A1, A2 et B1, B2. A1B1 correspondant au moment magnétique de l'électron II au champ et A2B2 au moment magnétique de l'électron I au champ. La séparation entre A1 et A2, B1 et B2 est proportionnelle au champ appliqué. Si on veut mesurer l'énergie émise ou absorbée lors d'une transition entre A1 et A2 ou B1 et B2, on peut déterminer l'intensité du champ.

En pratique les atomes sont illuminés avec une lumière ayant une fréquence de (A1 - B1)/h. La seule transition possible est donc de B1 à A1. Chaque quantum de lumière qui monte un électron de B1 à A1 est donc enlevé du rayon de lumière par absorption. Puisqu'il s'agit de nombreux atomes, il y a donc une diminution mesurable de la lumière. Eventuellement tous les atomes vont passer de B1 à A1 et la vapeur contenant les atomes devient complètement transparente à la lumière. A ce moment, la vapeur est irradiée avec une onde radio dont la fréquence varie continuellement. Lorsque la fréquence de l'onde correspond à ΔE entre B1 et B2, les électrons du niveau B2 commencent à migrer vers B1. Lorsqu'ils arrivent au niveau B1, ils peuvent alors monter au niveau A1, d'où baisse de l'intensité lumineuse. La vapeur devient donc « opaque » et la fréquence de l'énergie entre B1 et B2 est connue (Budker et Romalis, 2008; Jiménez-Martínez et al., 2012). Les magnétomètres correspondants sont largement utilisés en prospection et ils sont quasiment absolus.

2.5.2. Les magnétomètres à vanne de flux

Les magnétomètres à vanne de flux sont souvent utilisés en cartographie magnétique appliquée à l'archéologie mais nettement moins souvent en exploration géophysique pour

laquelle les magnétomètres à pompage optique sont très fréquents (Nabighian et al., 2005). Leur sensibilité est moins bonne, avec une précision de l'ordre de 0,1 nT et ne sont pas absolus, la précision absolue étant de 1 à 100 nT (Pavel Ripka, 2000).

L'élément de détection est composé d'une barre d'un matériau à haute perméabilité magnétique entourée de deux bobinages. Si le bobinage est traversé par un courant alternatif (environ 1000 Hz), le champ induit dans la barre va amener une saturation au cours de chaque demi-cycle et un cycle d'hystérésis va apparaître (Figure1.11).

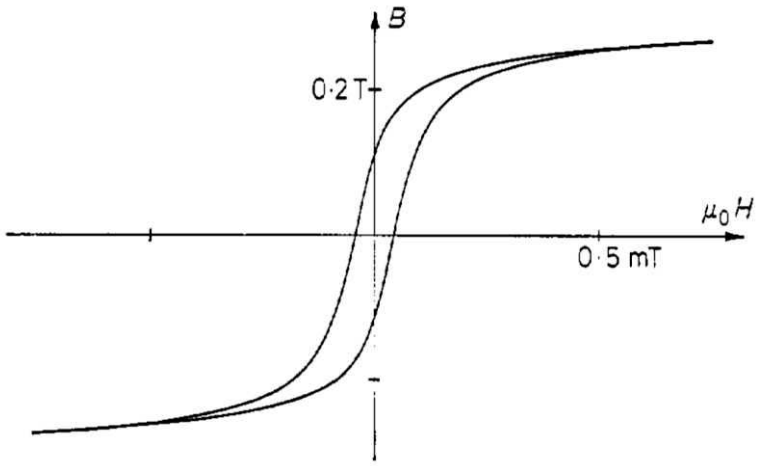


Figure 1.11 ***boucle d'hystérésis montrant la relation entre l'application du champ magnétique et le champ induit dans un matériau à haute perméabilité magnétique lorsque la saturation est atteinte (Primdahl, 1979).***

Une sonde à vanne de flux est constituée d'un noyau de métal à haute perméabilité, considéré homogène isotrope, de susceptibilité magnétique χ, et de deux enroulements: un dit primaire, parcouru par un courant de pulsation ω, et un secondaire (ou de mesure), comportant *n* spires. On note *x* la direction de l'axe de la sonde.

L'excitation magnétique **H** dans le noyau selon *x* est la somme de l'excitation externe selon *x* $\mathbf{H_{ex}}$ et du champ démagnétisant $\mathbf{H_D} = -D.\chi.\mathbf{H}$, où *D* est le facteur de démagnétisation. On en déduit que

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{H}_{\text{ex}}}{1 + D\chi}$$

L'induction magnétique **B** dans le noyau étant égale à $\mu_0.(1+\chi).\mathbf{H}$, et l'induction "externe" (due à $\mathbf{H_{ex}}$) $\mathbf{B_{ex}}$ à $\mu_0.\mathbf{Hex}$, il vient

$$\mathbf{B} = \frac{1 + \chi}{1 + D\chi}.\mathbf{B}_{\text{ex}}$$

En définissant la perméabilité apparente $\mu_a = \frac{1+\chi}{1+D.\chi}$ on peut écrire $\mathbf{B} = \mu_a.\mathbf{B_{ex}}$

La différence de potentiel *V* mesurée aux bornes de l'enroulement secondaire est donnée par, considérant que les vecteurs sont selon l'axe de la sonde

$$V = n.A.\frac{dB}{dt}$$

où *A* est la section efficace du noyau. Soit encore

$$V = n.A.B_{ex}.\frac{d\mu_a}{dt}$$

Cette dernière équation est l'équation fondamentale de la sonde à vanne de flux. Quand le noyau est soumis à une excitation externe selon *x* sinusoïdale de pulsation ω (soit H_P) sans composante continue, la perméabilité apparente μ_a est périodique de pulsation 2ω. L'analyse de Fourier sur la différence de potentiel *V* montre alors que tous les termes de rang pair sont nuls.

Lorsqu'une composante continue H_C selon *x* est rajoutée au champ primaire H_P, l'analyse de Fourier de *V* montre que les termes de rang pair ne sont plus nuls. L'amplitude crête à crête du terme de rang 2 a pour forme générale $|V_2| = 2.n.A.\omega.F.H_C$.

où *F* est un "facteur de forme" qui dépend des propriétés du matériau et de sa géométrie. On peut donc déterminer H_C selon *x* à partir d'une analyse de Fourier de la tension de sortie aux bornes de l'enroulement secondaire

Ce type de capteurs est souvent utilisé en gradiométrie. Deux capteurs sont montés parallèlement à une distance de quelques dizaines de centimètres et le signal numérisé est la différence de la composante du champ magnétique dans la direction des sondes. Si on considère que les défauts des sondes sont à peu près les mêmes, en particulier leur dérive en température, on peut considérer que la mesure est moins affectée par ces défauts (Scollar et al., 1986; Ripka 2003).

Chapitre2: synthèse des contextes archéologiques et magnétiques

Chapitre2: synthèse des contextes archéologiques et magnétiques 45
Chapitre2: synthèse des contextes archéologiques et magnétiques 47
1. Introduction 47
1.1. Contexte général 47
1.2. Age du Bronze dans le Moyen-Orient 48
1.3. État des connaissances sur les villes circulaires en Syrie 51
1.4. Quelques éléments de l'histoire de la recherche portant sur les villes circulaires de Syrie 53
2. Les villes circulaires en Syrie 54
2.1. Tell Khuera 54
2.2. Tell Beydar / Nabada 56
2.3. Le West Jazireh Survey et Mari 58
3. Les sites faisant l'objet des cartographies magnétiques 60
3.1. Tell Al-Rawda 60
3.1.1. Localisation du site 60
3.1.2. Le milieu géographique et climatique 62
3.1.3. Contexte archéologique 63
3.1.3.i. Secteur 1 : complexe religieux au nord-est du site 66
3.1.3.ii. Secteur 2a : le rempart à l'ouest 69
3.1.3.iii. Le secteur 2b: la porte nord de la ville 69
3.1.3.iv. Le Secteur 2C 70
3.1.3.v. Le secteur 4 : sud-ouest du site, quartier d'habitation 72
3.1.3.vi. Le secteur5 74
I.3.1.3.vi.1 Le bâtiment C51 75
I.3.1.3.vi.2 Le bâtiment C50 75
3.1.3.vii. Le secteur 6 un carrefour au nord-ouest de la ville 76
I.3.1.3.vii.1 Niveau 1 77

I.3.1.3.vii.2 Niveau 2 77
I.3.1.3.vii.3 Niveau 3 77
3.1.4. L'étude céramologique 78
3.1.4.i. Matériaux 79
3.1.4.ii. Morphologie 79
3.1.4.iii. Datation 79
3.2. Tell Sh'airat 79
3.2.1. Localisation du site 79
3.2.2. Le milieu géographique et climatique 81
3.2.3. Contexte archéologique 81
3.3. Tell Malhat Ed-Deru 82
3.3.1. Localisation du site 82
3.3.2. Le milieu géographique 83
3.3.3. Contexte archéologique 86
4. Les études géophysiques 88
4.1. Tell Al-Rawda 88
4.1.1. Le réseau principal 90
4.1.2. Le réseau secondaire 91
4.1.3. L'organisation du bâti au sein du site 91
4.2. Tell Sh'airat 93
4.3. Tell Malhat Ed-Deru 94
4.4. Mari 94
5. Conclusion 96

Chapitre2: synthèse des contextes archéologiques et magnétiques

Ce chapitre présente les trois sites archéologiques syriens (Malhat Ed-Deru, Al-Rawda, Sh'airat) pour lesquels les cartographies magnétiques et leur interprétation ont été réalisées. Il ne s'agit pas de faire une synthèse des travaux des archéologues, mais de trouver et comprendre leurs principaux résultats permettant d'aider l'interprétation géophysique et d'essayer de comprendre précisément ce que peut apporter la géophysique à leurs travaux. Selon les références, on trouve des orthographes et même des noms différents pour chacun des trois sites et, dans un souci de cohérence, j'ai choisi le nom qui me parait le plus fréquent et récent à savoir Malhat Ed-Deru, Al-Rawda, Sh'airat.

3. Introduction

3.1. Contexte général

La Syrie se situe au Moyen-Orient à l'est de la mer Méditerranée, sous des latitudes subtropicales septentrionales, et jouit de caractéristiques géographiques particulières et des établissements développés. L'essentiel du territoire syrien est constitué par un vaste plateau calcaire surmonté de quelques anciens reliefs volcaniques Djebel Al-Arabe (Djebel druze) et traversé au nord-est par le fleuve Euphrate (Figure 2.1). Les reliefs traversant le plateau sont marqués. Ils s'étendent du sud-ouest au nord-est jusqu'à l'Euphrate et on trouve notamment le Djebel Abu Rujmayn et le Djebel Bishri.

Au nord-est de l'Euphrate se trouve la région fertile du Djézireh qui est baignée par deux affluents de l'Euphrate, le Balikh et le Khabur (Bertin,1997).

La Syrie est un territoire connu comme le berceau de plusieurs cultures et la civilisation de la période près historique jusqu'à l'empire empire ottoman, où se trouvent des milliers de sites archéologiques et historiques. Dans l'histoire, la Syrie occupe une place exceptionnelle de par sa situation. C'est un carrefour de plusieurs mondes : la Méditerranée, la Mésopotamie, la Perse, l'Inde, l'Asie mineure, les terres du Caucase et l'Égypte, c'est-à-dire un nœud de communication d'importantes voies commerciales, entre l'Europe, la Chine (route de la soie) et l'Inde. La Syrie occupe aussi une place importante dans l'histoire de l'humanité. C'est également en Syrie, que l'homme découvrit comment utiliser le cuivre, comment le façonner et en réaliser un alliage, le Bronze. Dès le IIIe millénaire av. J.C. les Syriens construisaient des palais, créaient des fresques, et connaissaient un essor culturel et commercial remarquable (Fortin, 1999).

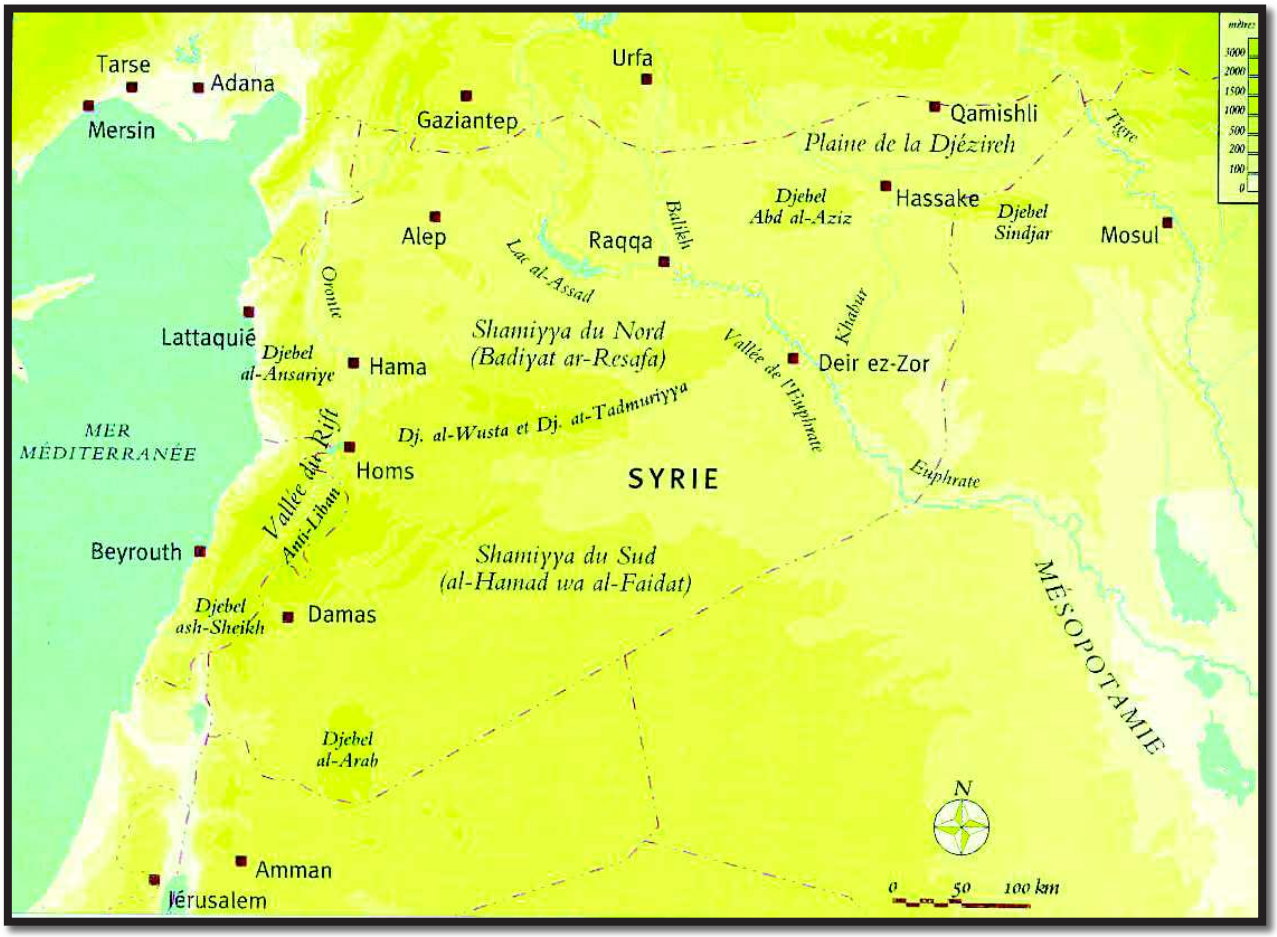


Figure 2.1 ***Carte du Proche-Orient (Cartographie : Martin Sauvage) (Bertin 1997).***

À l'exception de la plaine côtière qui bénéficie d'un climat méditerranéen, le climat est continental et sec. Généralement, la Syrie peut être divisée en deux régions : une région humide et semi-humide à l'ouest et une zone semi-aride et aride au centre, à l'est et sud-est, avec quelque exception locale (Bertin, 1997).

Les pluies sont arrêtées par la barrière montagneuse qui longe la méditerranée et provoque des pluies importantes sur la façade maritime et une aridité véritable du côté intérieur. Les hivers sont froids (4,4 °C à Alep, en janvier) et les étés très chauds (30,8 °C à Tadmor, à la limite du désert de Syrie, en août). Les précipitations annuelles varient de 510 à 1 020 mm dans les régions côtières, de 255 à 510 mm entre Alep et Damas et de 25 à 127 mm dans le désert (Margueron, 2003).

3.2. Age du Bronze dans le Moyen-Orient

Comme les géologues, les archéologues se sont accordés pour admettre une division du temps des périodes historiques. Cette division a été proposée par le Danois Christian Thomsen en 1816-1819 et l'échelle actuellement utilisée se divise en l'âge de la Pierre, du Bronze et du Fer d'après la matière première prédominante (Tableau 1).

	Âges préhistoriques		
Holocène	La Tène	400 à 100 av. J.C.	Protohistoire
	Halstatt	800 à 400 av. J.C	
	Âge du fer	Age de fer	
	Bronze final	1500 à 1100 av. J.C	
	Bronze moyen	1500 à 1100 av. J.C	
	Bronze ancien	1800 à 1400 av. J.C	
	Âge du bronze	Age de Bronze	
	Chalcolithique	- 3000 av. J.C	
	Néolithique	9 000 ans av. J.C., 3 300 ans av. J.C.	Préhistoire
	Mésolithique / Épipaléolithique	10 500 - 10 000 ans	
Pléistocène	Paléolithique supérieur	35 000 - 10 000 ans	
	Paléolithique moyen	300 000 ans - 30 000 ans	
	Paléolithique inférieur	1 Ma - 300 000 ans	
	Paléolithique		
	Âge de la pierre		

Tableau 1 : Chronologie archéologique approximative en Europe (Peter, 2015)

Pour la période de l'âge de Bronze comme pour l'âge préhistorique les limites chronologiques varient selon la région du globe, ("Âge du bronze" 2015). En Syrie l'âge du Bronze commence en 3100 av. J.C. Les archéologues utilisent une chronologie plus précise que celle du Tableau 1 selon les matériels issus aux différents sites et depuis le IIIe millénaire av. J.-C (Tableau 2, Ali, 2012).

Phases archéo-logiques	Date	Mésopotamie Sud – Époque / Période	Mésopotamie Nord	Iran		Haut Euphrate/ Syrie Nord		Anatolie	
	539-331	Achéménide	Hégémonie perse	539 ↕ 646	Empire Perse	La Syrie est annexée par l'empire Perse			
	610-539	Néo-babylonienne	Empire néo-babylonien	↕ 743	Néo-élamite III	600	La Syrie devient province néo-babylonienne Province assyrienne	700	Royaumes néo-Hittites
Âge du Fer	610 ↕ Xe siècle	Néo-assyrienne	Empire néo-assyrien	↕ 1100	Néo-élamite II Néo-élamite I	750		↕	
				↕		950	Royaumes Araméens	1200	Nouvel empire Hittite
Âge du Bronze récent	1000 ↕ 1350	Médio-assyrienne	Empire médio-assyrien		Médio-élamite				
				1455 ↕ 1500		1450	Empire mitannien	1450	
	1594- 1200		Royaume Cassite en Babylonie / Empire mitannien (1500-1370)						Ancien empire Hittite
	1760-1594	Royaumes amorites	Ancien Empire Babylonien	↕	Dynastie de Sukkalmah				
Âge du Bronze moyen	2003-1760		Babylone / Assur	1900 ↕	Dynastie de Simashki	Ville III		Âge du Bronze ancien	
	2111-2003	Néo-sumérienne	Ur III						
	Env. 2150		Gudea de Lagash						
	Env. 2250		Domination des Guti						
	2350-2200	Akkadienne	Empire d'Akkad				Ebla		
	2550-2350	Dynastique Archaïque III (A et B)	DA III	2340 ↕ 2700	Dynastie d'Awan Suse IV				
	2750-2550	Dynastique Archaïque II	DA II			ville II			
	2900-2750	Dynastique Archaïque I	DA I	↕	Suse III 10-15	ville I			
PÉRIODE PROTO-	3100-2900	Uruk final (Ex Jemdet Nasr)	Hamra d'Uruk III / Jemdet Nasr / d / Ninive V	Proto-élamite (3100-2750)	Suse III. 16 Suse II. 17	Mari	Brak TW I	Brak TW 10-2	Arslan Tepe VIb
	3350-3100	IC 5 / Uruk récent	IVA / IVB-V / VI / Nippur XVI-XVII / Protoliterate / Ninive IV	récent ↕ Proto-Urbain ↕	Chogha Mish Suse II. 17 ancien Suse II. 18 tardif	Habuba Aruda	Sheikh Hassan 4	Brak TW 12	Arslan Tepe VIa
					Suse II. 18 récent Suse II. 18 ancien		Sheikh Hassan 5/7	Leilan IV	Arslan Tepe VI
	3400	Uruk moyen	VII / Nippur XVIII / Ninive III		Suse II. 19	Qraya	Sheikh Hassan 8/10-13	Brak TW 13	
	3600		IX-VIII / Nippur XX-XIX / b	moyen	Suse II. (21-20)			Brak TW 17-14 Leilan V	Arslan Tepe VII
	3800	IC 4	X-XI / Warka	↕ ancien	Djafarabad Suse II. (22)				
	4000		XII / a / Gawra B (50-15)		Suse I (27-23)	Hammam et Turkman V A -B		Brak TW 18-19	
	4200	IC 3 recent / IC 3 ancien / Uruk ancien	XIII / XVI-XIV / Gawra XII						Değirmentepe
CHALCOLITHIQUE		IC 2	XVIII-XVII-XIX / Gawra XIII	Susiana. d		Hammam et Turkman IV D		Leilan VIb	Arslan Tepe VIII
	4500								
	5000	IC 1 « Obeid »	Obeid 3 / Post Obeid / Ninive II	Susiana. c					
	5200		Arpatchiyah / Tepe Gawra A	Susiana. b		Sabi Abyad II			
	5800-5400	« Halaf »	Obeid 2	Susiana. 1-2		Halaf (3-4)			Çatal Hüyük (I)
NÉOLITHIQUE	6400-5800	« Halaf Samarra Hassuna » Début de la céramique	Obeid 1 / Obeid 0 / Ninive I / Samarra Hassuna Yarimtepe I	. Susiana archaic II (Susiana a)		Halaf (1-2)			Çatal Hüyük (III-II) Çatal Hüyük (VII)
	6900-6400		Oueili / Umm Dabaghiyah	Susiana archaic I		Abu Hureyra / Buqras Sabi Abyad I			
	7600-6900	PPNB final PPNB PPNA	Jarmo (a-céramique)	Ganj Dareh Ali Kosh (Bus Mrdeh)		Ramad			Çatal Hüyük (IX-XII)
	8800-7600								Hacilar
	10200-8800					Mureybet			

Tableau 2 : Tableau chronologie du Proche-Orient ancien (Ali, 2012)

À Tell Khuera, les périodes sont classées selon des sondages stratigraphiques faits dans cette région et elles sont nommées par IA, IA/IB, IB, IC, ID et IE (Tableau 3). Il y a aussi une

autre chronologie pour la Jézireh, numérotée de 1 à 5. Ces deux classements sont définis dans un cadre chronologique absolu (Tableau 3, Quenet, 2013).

Périodes	Dates calibrées av. J.C.	Jézireh Ancien
	3100	
IA		0-1
IA/IB	2800	
IB		
IC	2650	2
ID	2300	
IE		3
	2200	
		4

Tableau 3 : Chrono-stratigraphie de Tell Khuera

3.3. État des connaissances sur les villes circulaires en Syrie

Les recherches consacrées aux premières villes de Syrie sont déjà anciennes mais de nombreux résultats restent débattus. Elles ont particulièrement porté sur les établissements fondés par la culture sumérienne de Mésopotamie méridionale (culture Uruk) sur le Moyen-Euphrate au cours de la deuxième partie du IVe millénaire av. J.-C. (Buterlin, 2013). Ces établissements ont peu de relation avec les villes nettement syriennes nées, pour les premières, vers 3000 av. J-C., ou même plus tôt, dans les milieux arides ou semi-arides du Nord de la Syrie. Les résultats des fouilles les plus récentes indiquent que ces processus d'urbanisation sur l'ensemble de la Syrie du Nord commencent au milieu du IIIème millénaire av. J-C.

Les recherches concernant l'urbanisation de la Syrie et des « premières villes » sont encore incomplètes. Elles ne sont basées que sur l'étude de quelques grands sites comme Ebla, Mari, Tell Beydar ou Tell Brak (Figure 2.2). Les sites sont étudiés pour eux-mêmes (le plus souvent, même, indépendamment de leur territoire) et il est exceptionnel que les recherches portent sur les caractéristiques communes de ces villes, leurs liens et leur évolution en termes de dynamique régionale. Ces villes sont le plus souvent dénommées

sous le terme commun de « *Kranzhügel* » (ou « buttes à couronne » en français). Les caractéristiques communes de ces établissements sont principalement d'agglomérations fortifiées, bâties selon un plan circulaire et constituées d'une « ville haute » surmontant une « ville basse » périphérique (Lebeau et Suleiman ,2007). Cette organisation explique que l'expression le plus souvent utilisée celle de « villes circulaires ». C'est celle que j'utilise dans la suite de ma thèse.

Il existe une notion plus générale pour décrire ces villes qui correspond au mot tell. Un tell correspond à une élévation du terrain, sous la forme d'une colline plus ou moins bien marquée et contenant des couches archéologiques (Joannès, 2001).

Enfin, du point de vue de l'organisation générale des villes circulaires, les fouilles montrent que la ville basse n'est pas toujours présente (Margueron, 2004).

Les premières traces de villes circulaires remontent au IIIe millénaire av. J-C. et se trouvent plutôt au nord de la Syrie et progressivement, on en trouve plus au sud. Il n'y a pas d'explication claire permettent de comprendre cette expansion et les archéologues cherchent à la comprendre ce qui constitue l'une des raisons d'être du projet ANR Franco-Allemand « Badiyah" (Castel et Meyer, 2009). Plus précisément, les relations entre les villes circulaires de Syrie du Centre-Ouest avec leurs parentes de Jezireh sont un enjeu important du projet. Les sites concernés par ces recherches sont tous situés en zone de marge (Badiyah) où les précipitations sont faibles et irrégulières et ont la même morphologie (il s'agit de villes circulaires fortifiées et planifiées, organisées autour de voies radiales et concentriques et pourvues de temples du même type).

Les principaux objectifs du programme sont les suivants :

- Identifier l'histoire de ces villes circulaires depuis leur naissance en Syrie du Nord (ex. Tell Chuera, Tell Mabtuh Esh-Sharqi) jusqu'à leur diffusion vers le sud-ouest (Tell Al-Rawda, Tell Esh-Sha'irat, Khirbet Al-Qasr) et le sud du Jebel Abd al Aziz (Tell Malhad Ed-Deru)
- Mettre en évidence les points communs et les différences entre chacune de ces régions.
- Mieux comprendre l'environnement antique de ces établissements et l'exploitation de leur territoire.

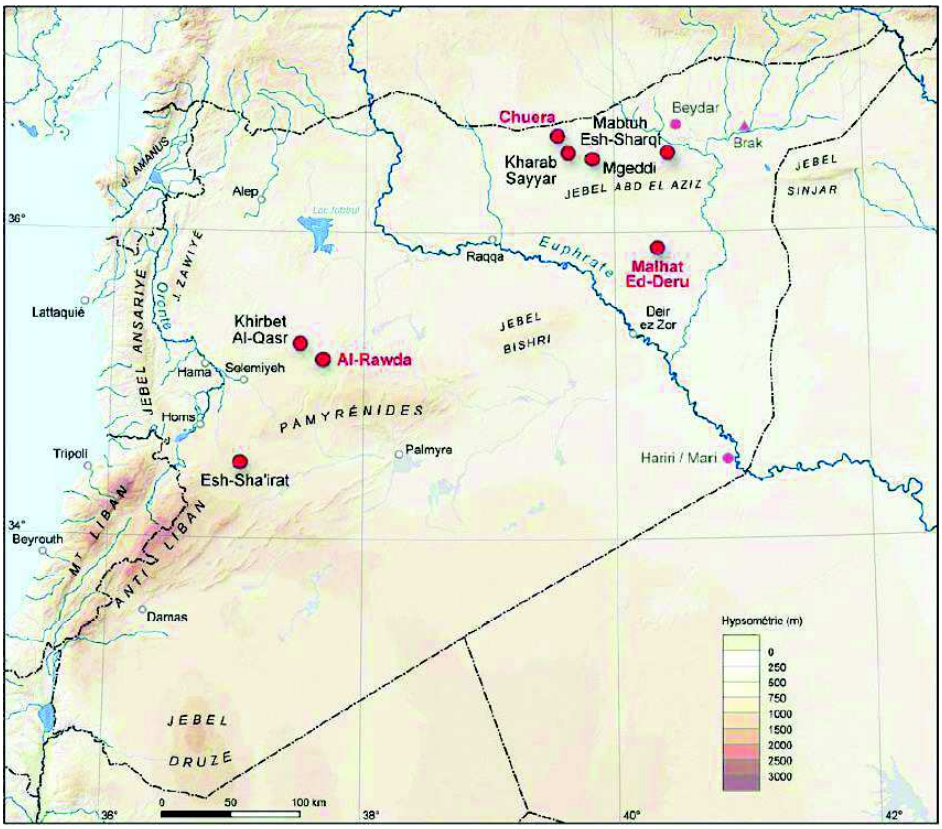


Figure 2.2 ***Carte des sites archéologiques concernés par le projet ANR–DFG Badiyah (Castel et Meyer 2009).***

3.4. Quelques éléments de l'histoire de la recherche portant sur les villes circulaires de Syrie

À la fin de la Deuxième Guerre mondiale, des archéologues se sont intéressés aux villes circulaires de la Jezireh syrienne, parmi eux Oppenheim et Poidebard. Leurs travaux n'ont pas été confrontés jusqu'à une date toute récente avec le lancement du programme ANR Badiyah. Avec Poidebard, la Jezireh fut l'objet d'une couverture photographique aérienne de grande ampleur. Il s'agit d'une collection de vues stéréoscopiques au 20 000ème d'une qualité exceptionnelle ayant pour but d'étudier la qualité des sols et les terres productives, de déterminer leur meilleure utilisation et fixer la limite des propriétés (Van et Lauffray, 1954). En 1955, J. van Liere a commencé une mission pour étudier la cartographie des sols au nord de la Syrie.

Van Liere et Lauffray (1954, 1955) ont fourni une dizaine de milliers de photographies qui couvrent une aire s'étendant de tell Dehlis à l'Ouest jusqu'à 'Ain Divar à l'Est et de la frontière turque jusqu'au sud de Jebel Sinjar. Ils ont aussi visité une centaine de sites de l'âge du Bronze Ancien. Leurs résultats décrivent des tells fortifiés se composant de deux plates-formes étagées avec deux remparts implantés en bordure de la dénivellation. Un des premiers résultats pratiques de ces recherches fut de permettre le choix d'un site qui fut

fouillé par le Service des Antiquités Syrien au cours des mois suivant, le Tell Khuera. Ces fouilles servirent à établir l'existence d'une occupation du IIIe millénaire av. J.C. pour les villes circulaires de Jezireh. Moorgat (1957a-b, 1959) fait un travail important de fouille jusqu'en 1976 à Tell Fekheriyeh. Il propose que la ville antique de Khuera fût culturellement liée au sud mésopotamien dès une époque aussi ancienne que le Mesilim-Zeit, c'est-à-dire le milieu du IIIe millénaire av. J.-C.

Suite à Oppenheim, Anton Moortgat (1897-1977) effectua des fouilles dans la Haute-Jezireh et en particulier sur le site de Tell Halaf.

A partir des années 1970, les travaux de prospection et de fouilles des allemands et des français s'intensifient en particulier dans le quart nord-est de la Syrie. Les corpus de données deviennent plus riches mais restent discontinus et les connaissances des grands sites comme Tell Khuera ou Mari s'améliorent.

4. Les villes circulaires en Syrie

Après les années 1950, les travaux se sont intensifiés pour les villes circulaires en Syrie surtout dans les années 1980 durant lesquelles de nombreuses prospections et fouilles ont été réalisées dans deux zones principales, en Haute-Jezireh (bassin du Wadi Hammar, triangle du Khabur, piémont du Jebel Abd el Aziz) et dans la moyenne vallée de l'Euphrate. Les principaux résultats concernent Tell Khuera, Tell Beydar et Mari.

4.1. Tell Khuera

Les travaux à Tell Khuera jusqu'au printemps 2011 ont été principalement réalisés sous la direction d'Anton Moortgat puis sous celle de Jan-Waalke Meyer *(*Goethe-Universität*,* Frankfurt/Main). Ils ont progressivement amélioré la définition de la notion de ville circulaire en introduisant la distinction entre ville haute („Hochtell" ou „Hochplateau") et ville basse („Plateau") (Figure 2.3). L'anneau vallonné (,,welliger Kranz") ceinture la ville basse et correspond à une dépression.

Figure 2.3 ***Vue générale de Tell Khuera, 1913 (© Max von Oppenheim Hausarchiv, photo D.849).***

Les fouilles ont montré que la ville circulaire remonte au Bronze Ancien. La période d'occupation est découpée en six périodes majeures (Tableau 3) définies à partir de l'évolution de l'assemblage céramique.

Il est probable que dès l'origine Tell Khuera est pourvu d'une enceinte et que sa structure interne est radioconcentrique. La superficie de la ville haute est à peu près égale à 27 ha. La ville basse qui n'apparait pas dès l'origine, fait plus que tripler la surface avec une largeur d'environ 100 m. Elle est protégée par un rempart et un fossé. Le rempart a été modernisé et sa forme a évolué pour adopter les traits d'un ouvrage à la Vauban. L'agglomération est abandonnée en IE (2200 – 2300 av. J.C.), mais les lieux sont réinvestis au Bronze récent.

Une prospection géophysique (cartographie magnétique) a été réalisée sur à peu près l'ensemble de la ville et elle a permis d'en définir une image assez précise. Le plan de la ville ainsi obtenu est géométriquement ordonné, étonnamment régulier et préservé, au moins dans ses grandes lignes ce qui peut paraitre étonnant au vu des sept à huit cents ans que dura l'histoire de la cité (Figure 2.4) Au sein de la trame urbaine une avenue radiale majeure se démarque et elle est d'orientation sud-est–nord-ouest. Elle rejoint depuis la ville basse le centre de la ville haute et, au-delà de celle-ci, conduit au palais. De part et d'autre de cette voie et autour de la place s'étendent des quartiers d'habitation ou des aires sacrées emmurées.

Autour de Tell Khuera, des travaux de prospection ont permis d'inventorier plus de cent soixante sites qui sont aussi datés. Certains sont des villes circulaires qui n'auraient pas grandi, c'est-à-dire qui sont restés bornés dans leur enceinte d'origine. La fouille et la prospection magnétique de deux de ces petits sites circulaires, Tell Kharab Sayyar et Tell Mjeddi au sud-est de Tell Khuera, ont confirmé leur pleine appartenance à la famille des villes circulaires en dépit de leur petite taille de quelques hectares, (Castel et Meyer, 2009; Quenet, 2013).

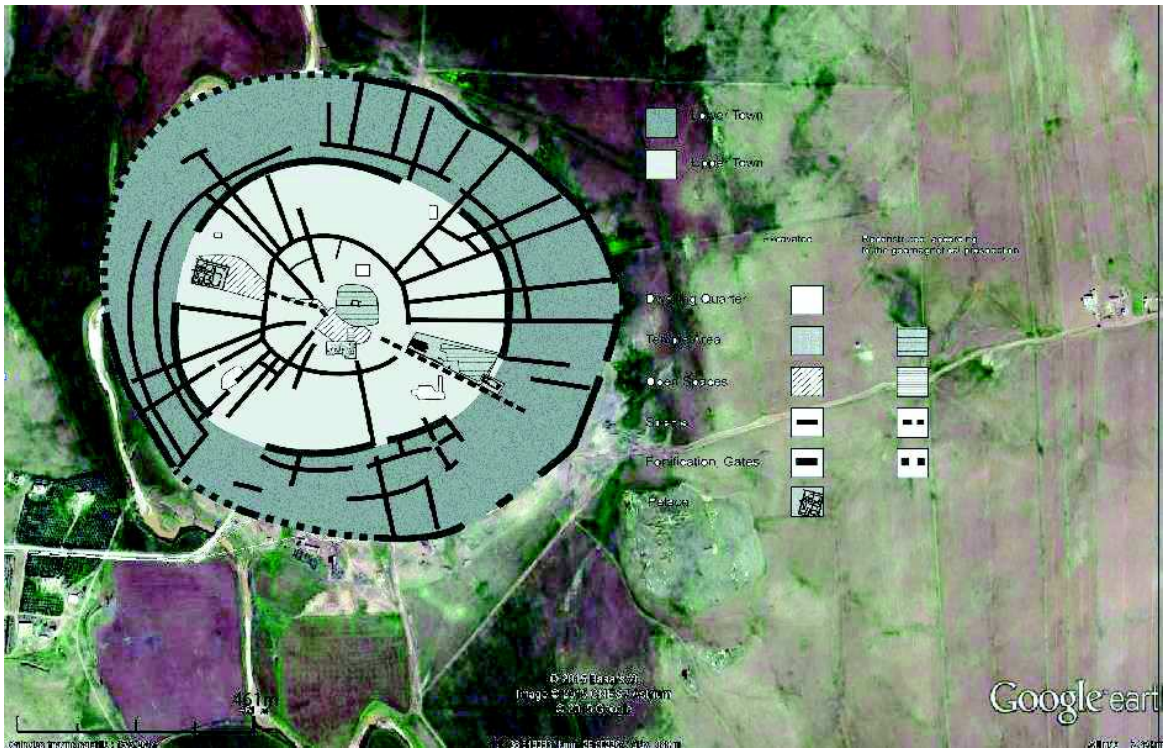


Figure 2.4 ***Schéma urbanistique de Tell Khuera sur fond d'image Google Earth (modifié d'après Meyer, 2007, fig. 9).***

4.2. Tell Beydar / Nabada

Le tell a été découvert en 1920 (Brossé, 1929). Les travaux au Tell Beydar (ancienne Nabada) ont commencé en 1991 avec des sondages préliminaires (la première campagne n'ayant eu lieu qu'en 1992) et continuent jusqu'à la fin 2010.

Figure 2.5 ***Vue générale de Tell Beydar depuis le nord, (photo Ph. Quenet, 1994).***

Le site de Tell Beydar est très similaire par sa morphologie aux sites circulaires du bassin du Wadi Hammar. Il possède une ville haute d'environ 8 ha qui représente à peu près un tiers de la superficie du site. Elle a pour originalité un centre qui est un sommet dépassant

de 27 m la plaine environnante. Ce sommet correspond à une acropole bâtie en terrasses (Figure 2.5).

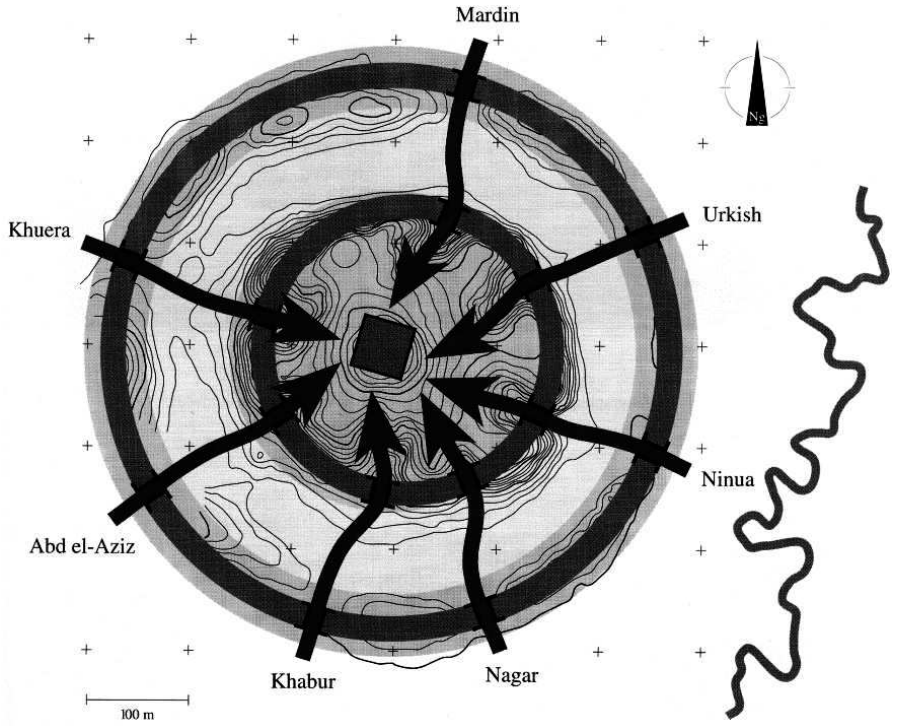


Figure 2.6 ***Enceintes et portes de Tell Beydar(Bluard et al. 1997) fig. 1).***

Les terrasses inférieures contiennent plusieurs édifices officiels, mais aussi des ateliers et des magasins. Vers le bas, s'étalaient vers le nord-est les quartiers domestiques de la ville haute, contenus dans le rempart intérieur dont la date de fondation remonte au moins au début du J.A. 2 (2700 av.J.C). L'enceinte extérieure fut pour sa part édifiée vers la fin du J.A. (2600 av.J.C), comme sur la plupart des autres villes circulaires, mais elle n'eut jamais une fonction défensive.

Comparé à Tell Khuera, Tell Beydar ne possède pas la même régularité remarquable même si la forme générale est de la voirie radioconcentrique (Figure2. 6).

Les résultats de la prospection archéologique réalisée dans un rayon de 12 km autour de Tell Beydar ont permis d'identifier quatre-vingt-trois sites dont douze sont datés de la première moitié du IIIe millénaire av. J.-C. et vingt de la seconde (Wilkinson, 2000; Wilkisnon, 2002). Aucun n'est circulaire. Durant le Jezireh Ancien, Tell Beydar était le plus gros établissement de la région, place centrale certainement dès sa fondation au J.A. 1(2900-2800 av.J.C). Le site était peut-être une capitale indépendante dans un premier temps, par contre, à la fin du J.A. 3(2500 av J.C), la cité était certainement passée sous l'autorité de Tell Brak (Sallaberger et Ur, 2004; Quenet, 2013). À cette époque, Tell Beydar n'aurait été occupé au total que sur 17 ha au maximum.

4.3. Le West Jazireh Survey et Mari

Une partie du programme du *Khabur Basin Survey* qui a été lancé par Frank Hole *(*Yale University) au début des années 1980 (Hole 1993-1994) avait pour objectif une prospection archéologique sur plusieurs années dans une zone encore pratiquement vierge de la Haute-Jezireh syrienne comprise entre les frontières orientales du bassin du wadi Hammar, les cours supérieur et moyen du Khabur et le piémont sud du Jebel Abd el Aziz (Figure2.7).

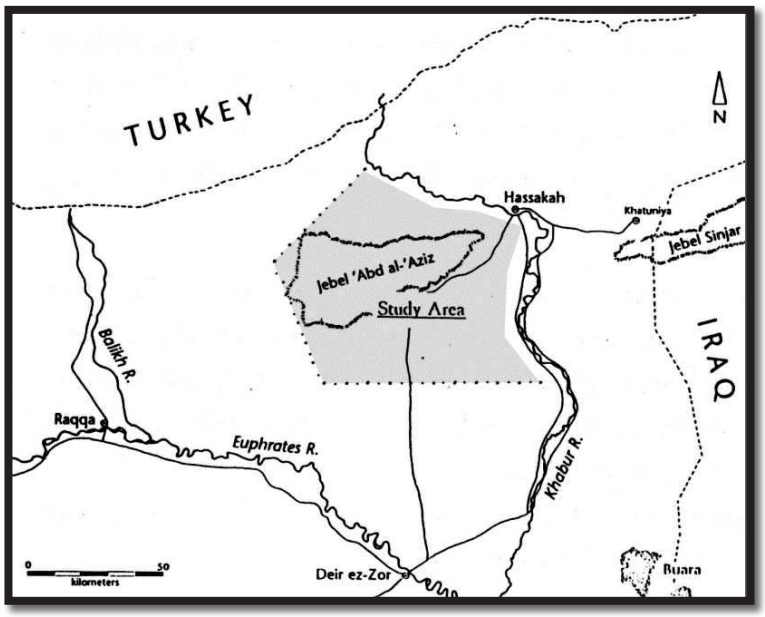


Figure 2.7 ***Aire de prospection intensive du West Jezirah Survey (Quenet, 2013).***

Les principaux résultats montrent des tessons de l'âge du Bronze ancien qui ont été identifiés sur cinquante et un sites (Kouchoukos 1999; Hole 2002) . Deux grandes phases d'occupation ont été identifiées, l'une couvrant la tranche 2900-2600 av. J.C., l'autre la tranche 2600-2300 av. J.C.

Le fouille de Mari encore appelé tell Hariri a commencé en 1933 sous la direction d'André Parrot (jusqu'en 1974), de Jean-Claude Margueron (1974-2004) et enfin de Pascal Butterlin (depuis 2005). La forme de ville circulaire avec deux enceintes n'a été révélée que récemment, car l'Euphrate, au gré des déplacements de son lit, a emporté une bonne partie du tell antique, n'en épargnant qu'un gros quart (Butterlin 2008 ; Butterlin 2010a; Butterlin 2010b).

Selon Margueron qui lui a attribué un âge du Bronze Ancien, son diamètre est d'environ 1900 m de diamètre et sa superficie de 300 ha. Le tell central se serait théoriquement étendu sur quelque 120 ha, une superficie supérieure au plus grand des tells du Bronze Ancien en Jezireh, Tell Khuera, qui n'en totalise que 90h (Quenet, 2013).

Pendant les premiers siècles du IIIe millénaire av. J.-C, le plan d'origine de Mari comportait deux enceintes, l'enceinte extérieure pour protéger le cœur de l'établissement des crues de l'Euphrate (Figure 2.8). Après cette époque, une ville basse a été ajoutée. Cette ville basse a été laissée sans construction et elle est majoritairement occupée par des jardins. Pendant les derniers siècles du IIIe millénaire avant J.-C, la ville a été reconstruite

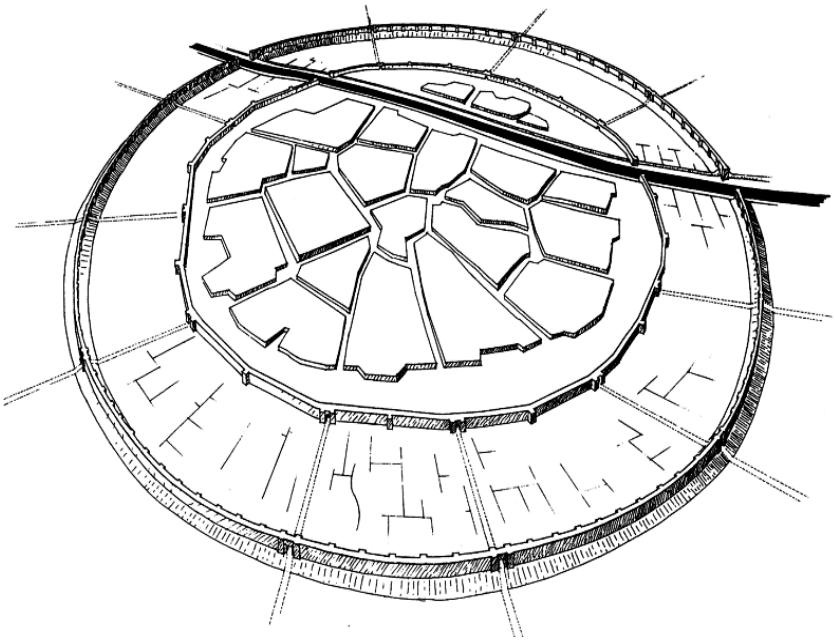


Figure 2.8 ***Morphologie d'ensemble de la Ville I de Mari (MARGUERON 2004, fig. 52).***

Selon les résultats obtenus, la structure interne de la ville apparait comme étant plutôt radiale que concentrique (Figure 2.9). En revanche dans la partie centrale de la ville, la circularité paraît assurée par le fait que les enceintes intérieures et extérieures furent continûment rebâties sur le même emplacement et selon un tracé curviligne ou polygonal.

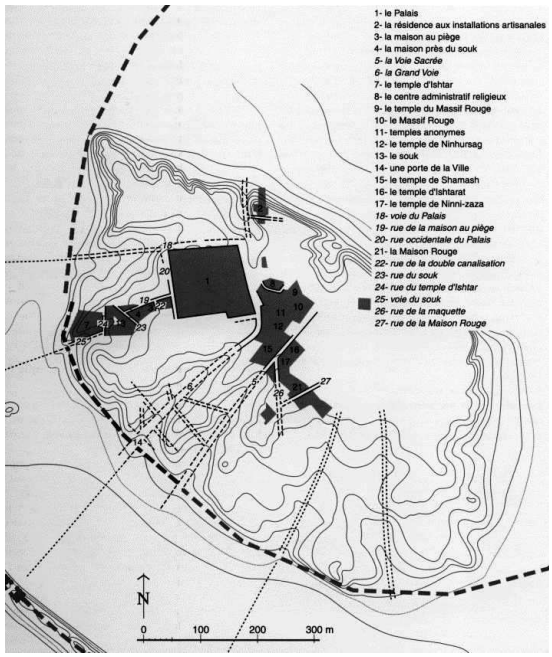


Figure 2.9 ***Quartiers et réseau viaire de la Ville II de Mari (Margueron 2004, fig. 120).***

5. Les sites faisant l'objet des cartographies magnétiques

5.1. Tell Al-Rawda

5.1.1. Localisation du site

Le site de tell Al-Rawda de la Bronze ancien, occupe un espace d'environ 11 ha *intra-muros* et la surface avec les fortifications de la ville s'étend à 15-16 ha. Un quartier d'habitation d'époque byzantine existe à l'extérieur de la ville, à l'extérieur des fortifications et occupe une surface d'environ 3-4 ha (Figure 2.10).

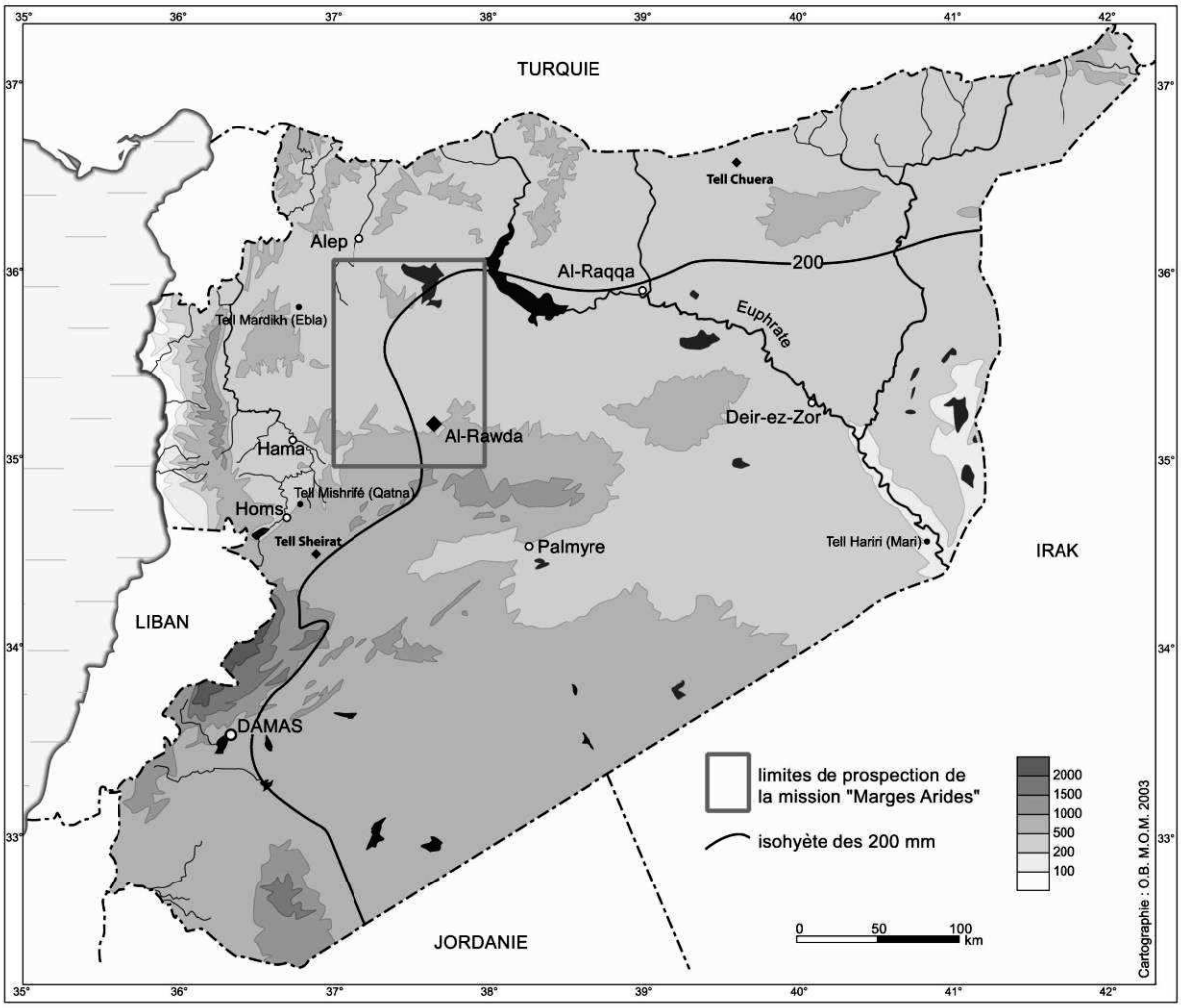


Figure 2.10 ***Localisation du site Al-Rawda.***

Ce site se situe à 150 km environ à l'est de la mer Méditerranée, en Syrie de centre ouest. Il est à 80 km à l'est de Hama et à 55 km au nord-est de Salamiyé. Il est aussi situé à 70 km au nord-est du site antique de Qatna. Actuellement, un petit village occupe une partie de la ville (Castel, 2008) (Figure 2.11).

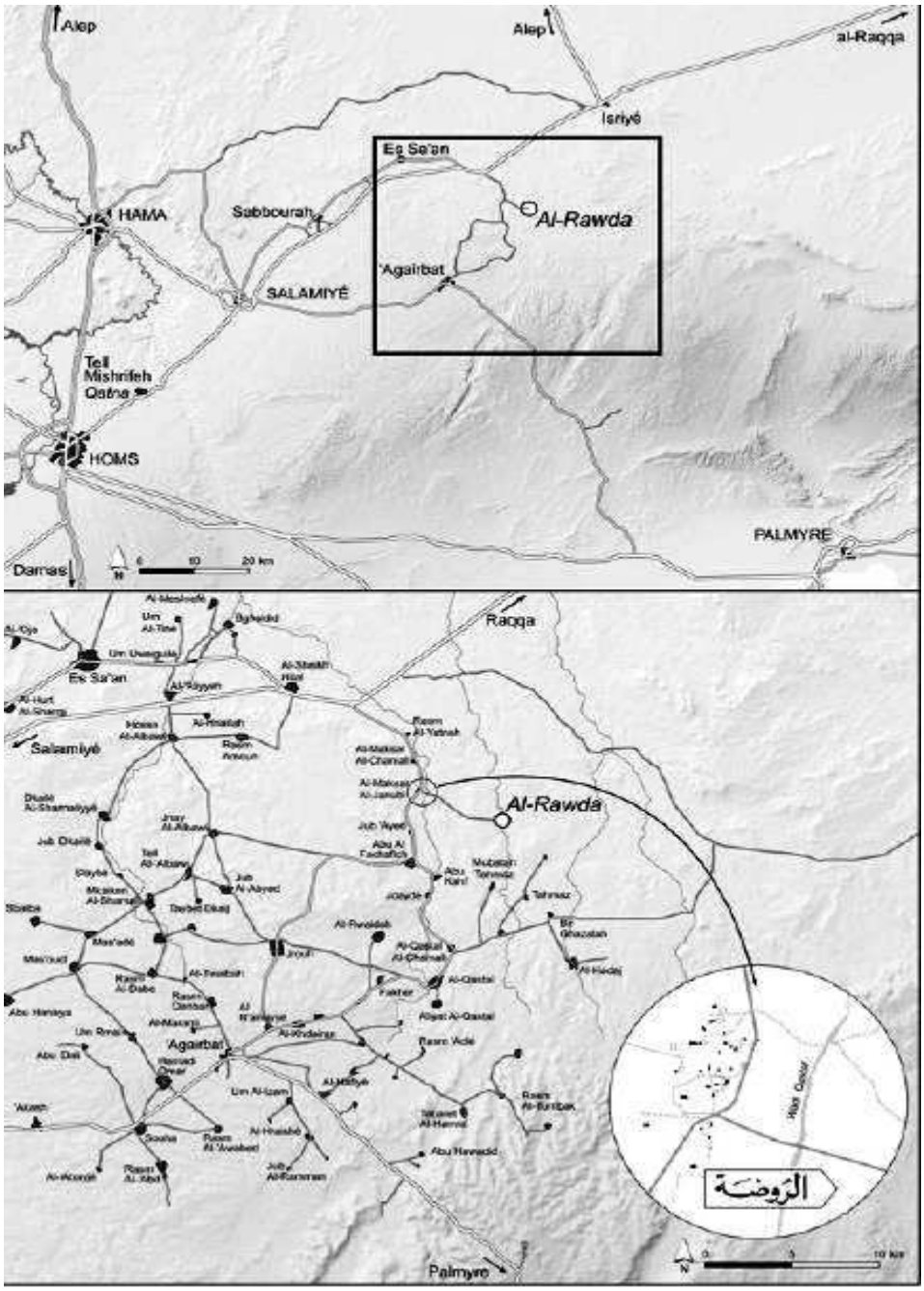


Figure 2.11 ***Carte de la région d'Al-Rawda et route d'accès au site (Castel et al, 2014).***

5.1.2. Le milieu géographique et climatique

Le climat dans cette région est un climat méditerranéen aride. Le paysage est un paysage de steppe. L'agriculture est très rare, le climat est sec et la pluviométrie moyenne annuelle est en général inférieure à 200 mm. Le climat de cette région est aussi très instable avec des vents de sable et quelques orages violents. Il correspond, par définition, à une zone de marge (Castel, 2007).

La localisation d'Al-Rawda au fond d'une vallée peu marquée au milieu d'un bassin naturel qu'on appelle régionalement une *fayda* lui donne un apport sédimentaire naturel. Cette *fayda* et les pluies saisonnières ainsi que la conservation des limons fertiles, permettent de développer quelques zones de cultures sèches comme celle de l'orge. Un oued, le wadi al-Amur, est en eaux deux à trois fois par an. Il s'écoule du sud vers le nord et contourne le site par l'est. D'autres petits oueds affluents existent à l'ouest.

Ces milieux favorisés que sont les *fayda* contrastent fortement avec les interfluves. Ces derniers sont occupés en surface par une croûte calcaire impropre à l'agriculture où l'on peut pratiquer en revanche de l'élevage. Ainsi, cette région est représentée par une forte différenciation de milieux naturels qui offrent des potentialités très diverses.

Les résultats des recherches archéologiques qui ont déjà été effectuées dans cette région montrent que le milieu n'a pas fondamentalement changé depuis le Bronze ancien IV au moins. D'autre part, les données archéologiques recueillies en stratigraphie montrent clairement un environnement steppique du site à cette époque avec, par exemple, une alimentation très spécialisée du mouton et de la chèvre (Vila et Besso, 2006). Ainsi, le site est toujours resté relativement aride comme il l'est de nos jours (Herveux, 2004 ; Castel et Peltenburg, 2007). Un système d'irrigation datant du Bronze ancien IV a bien été reconnu par les fouilles. Il permet de compenser des fluctuations climatiques d'amplitude modérée. Plusieurs années sèches consécutives sont assez fréquentes dans ce type de zone aride. Dans tous les cas, il n'y a pas d'indication d'un changement climatique majeur lié à l'abandon du site à la fin du troisième millénaire.

5.1.3. Contexte archéologique

le site Tell Al-Rawda qui date de l'âge du Bronze ancien (Castel et al., 2004; Castel et al., 2005; Castel et al., 2008) a été découvert lors de la prospection des marges arides conduite par Bernard Geyer (CNRS-UMR 5133 – université de Lyon II)(Geyer, 2001; Jaubert et Geyer, 2006).

Les travaux de fouille et la prospection intensive aux alentours du site ont débuté en 2002 dans le cadre d'une mission conjointe franco-syrienne et sous la double tutelle de la direction générale des Antiquités et des Musées de Syrie (DGAMS) et du ministère des Affaires étrangères.

Le Tell Al-Rawda contient toutes les caractéristiques d'une ville circulaire telle que la recherche archéologique en Jézireh les a définis: bâti différencié (maisons, bâtiments officiels) enfermé dans une enceinte circulaire (en réalité polygonale), gestion et exploitation ingénieuses des maigres ressources de la steppe locale, insertion dans un réseau régional (Figure 2.12).

Le site a été habité relativement peu de temps (trois à quatre siècles à peine) au regard des autres tells orientaux, occupés le souvent pendant plusieurs millénaires. Il fut abandonné sans destruction et sans avoir été réoccupé vers 2200 av. J.C. Ainsi, des vestiges du IIIe millénaire affleurent à la surface et il a été possible de procéder à des fouilles extensives sur les divers éléments qui constituent le tissu urbain. Quelques sondages creusés jusqu'au sol vierge ont permis de mieux connaître l'histoire du site.

En outre, une prospection géophysique complémentaire des fouilles a permis d'obtenir une vision globale de la ville. Celle-ci est circulaire, fortifiée, densément construite et organisée autour d'un réseau de voies concentriques recoupées par des rues radiales. Le bâti monumental et ordinaire respecte la voirie. Tell Al-Rawda est sans doute une ville qui fut planifiée avant d'être bâtie.

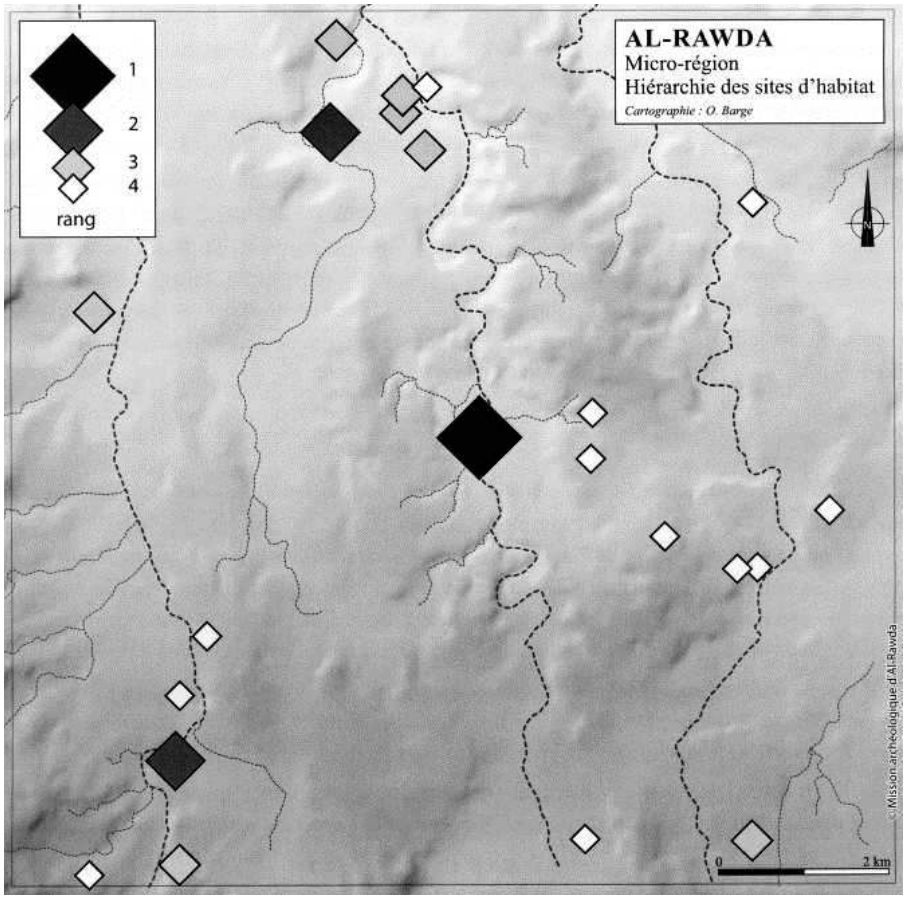


Figure 2.12 ***Hiérarchie des sites d'habitat dans la région de Tell Al-Rawda (Castel et al. 2008, fig. 16).***

Les constructions que l'on trouve dans les fouilles d'Al-Rawda consistent le plus souvent en soubassement et murs de brique crue. Les soubassements construits sont en pierres ; ils permettent d'asseoir les murs de brique. Sans eux, les constructions résistent moins bien au temps.

La brique crue est le plus souvent fabriquée à base de terre argileuse, de paille qui constitue un liant et d'eau. Le mélange réalisé est placé dans des moules en bois pour être séché à température ambiante. Cette opération est réalisée en quelques jours (Jonnès, 2001).

Parmi les objets extraits de la fouille, les céramiques sont importantes. Elles permettent de dater les niveaux d'occupation du lieu.

En neuf campagnes de terrain depuis 2002, les fouilles *intra-muros* ont porté sur six secteurs (Figure 2.13). Le résumé des résultats est fondé sur les comptes rendus, rapports et articles publiés par la Mission (Castel, 2004; Castel et al, 2005; Castel 2007; Castel et al 2008; Castel, 2008; Castel et al, 2014).

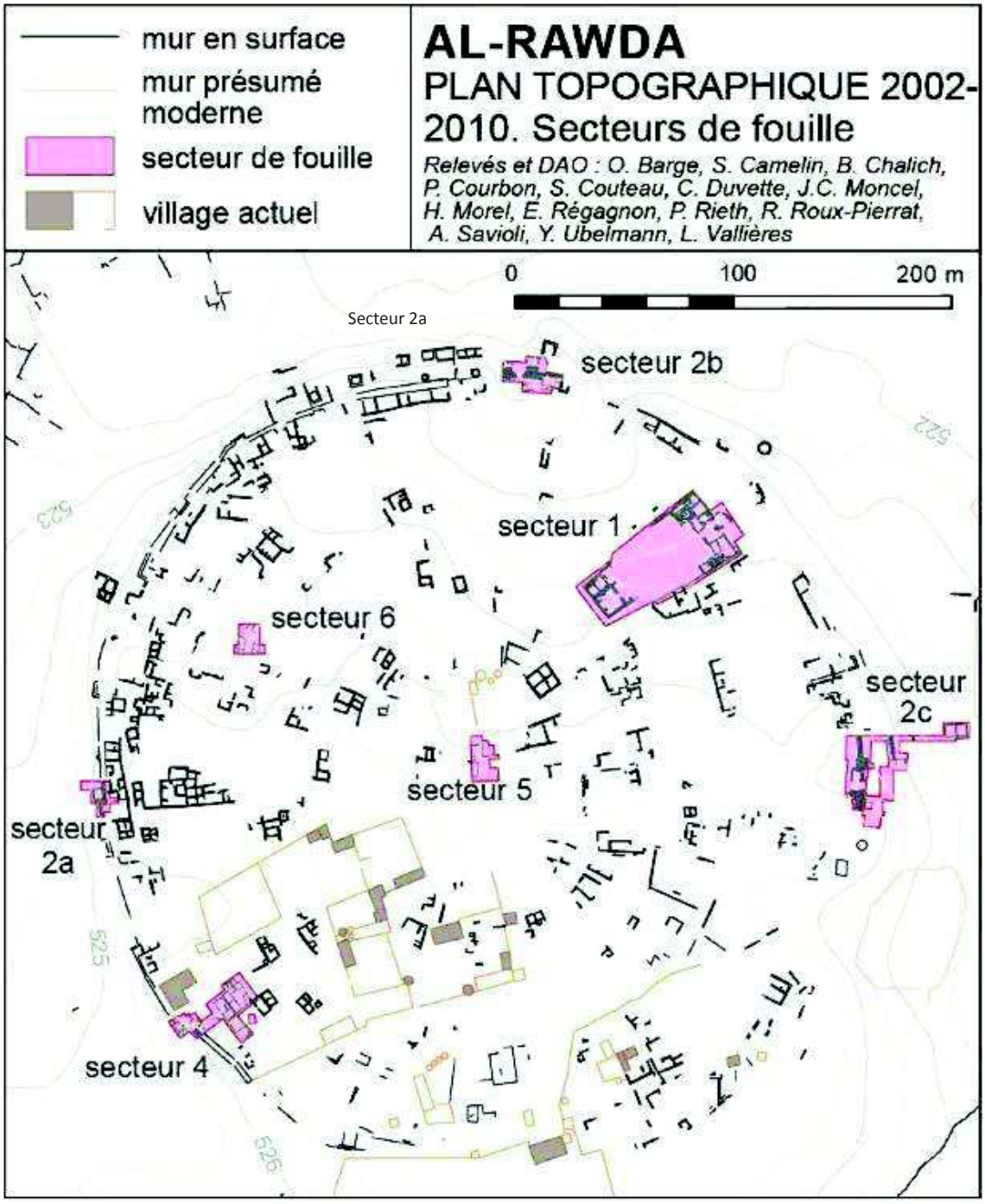


Figure 2.13 ***Plan topographique du site d'Al-Rawda présentant les différents secteurs de fouille (Corinne Castel © Mission archéologique d'Al-Rawda).***

5.1.3.i. Secteur 1 : complexe religieux au nord-est du site

Une observation de murs massifs en surface a guidé l'ouverture de la fouille. Elle est située au nord-est et couvre toute la surface des murs visibles en surface. Le sol vierge, c'est-à-dire avant toute occupation humaine, y a été atteint. Les travaux ont permis de mettre en évidence un grand temple à antes daté de Bronze ancien IV (Figure 2.14).

Il a été dégagé en totalité entre 2002 et 2008 et remonte aux alentours de 2200 av. J.-C. (Bronze ancien IVB). Il regroupe à l'état final, différents éléments : un grand temple à antes, dédié sans doute au dieu tutélaire de la cité ; un second temple plus petit, monocellulaire et accolé par son long côté méridional au précédent et, enfin, une vaste enceinte approximativement rectangulaire s'étend sur une soixantaine de mètres à l'avant des temples. Cette enceinte, qui fut fouillée en extension, est partiellement bâtie et compte 15 pièces et cours (Figure 2.14 et 2.15) (Castel et al., 2008).

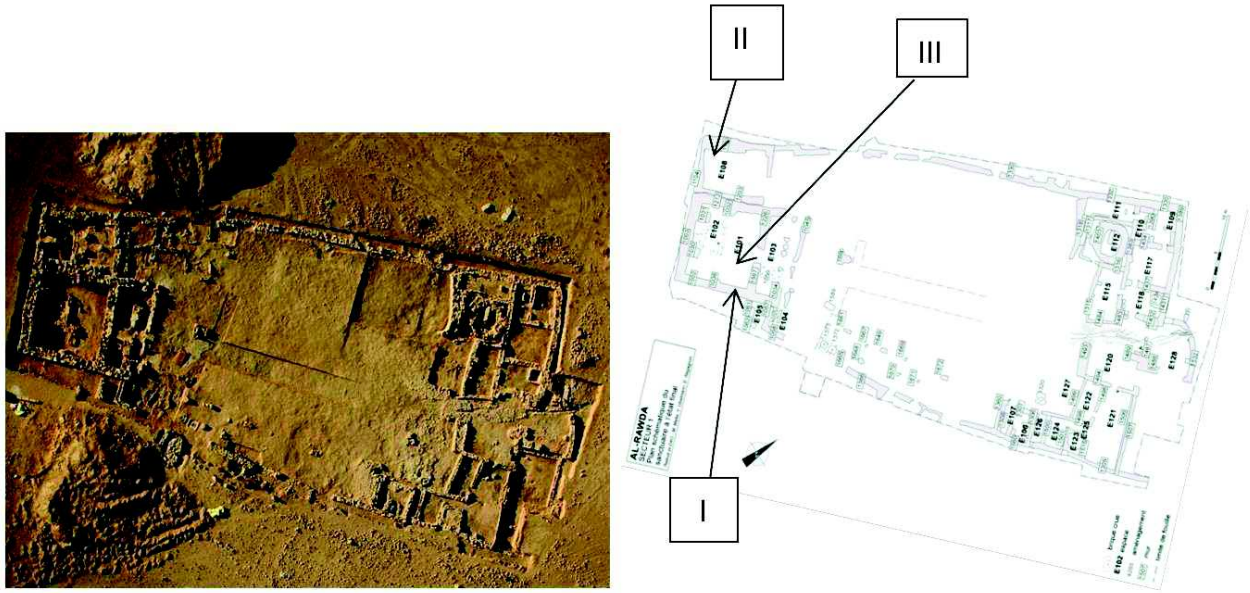


Figure 2.14 ***Photographie aérienne du complexe religieux du secteur 1 prise au cerf-volant au terme de la campagne2006. © Mission archéologique d'Al-Rawda; Cliché O. Barge. À gauche, l'état final de secteur 1 à droite.***

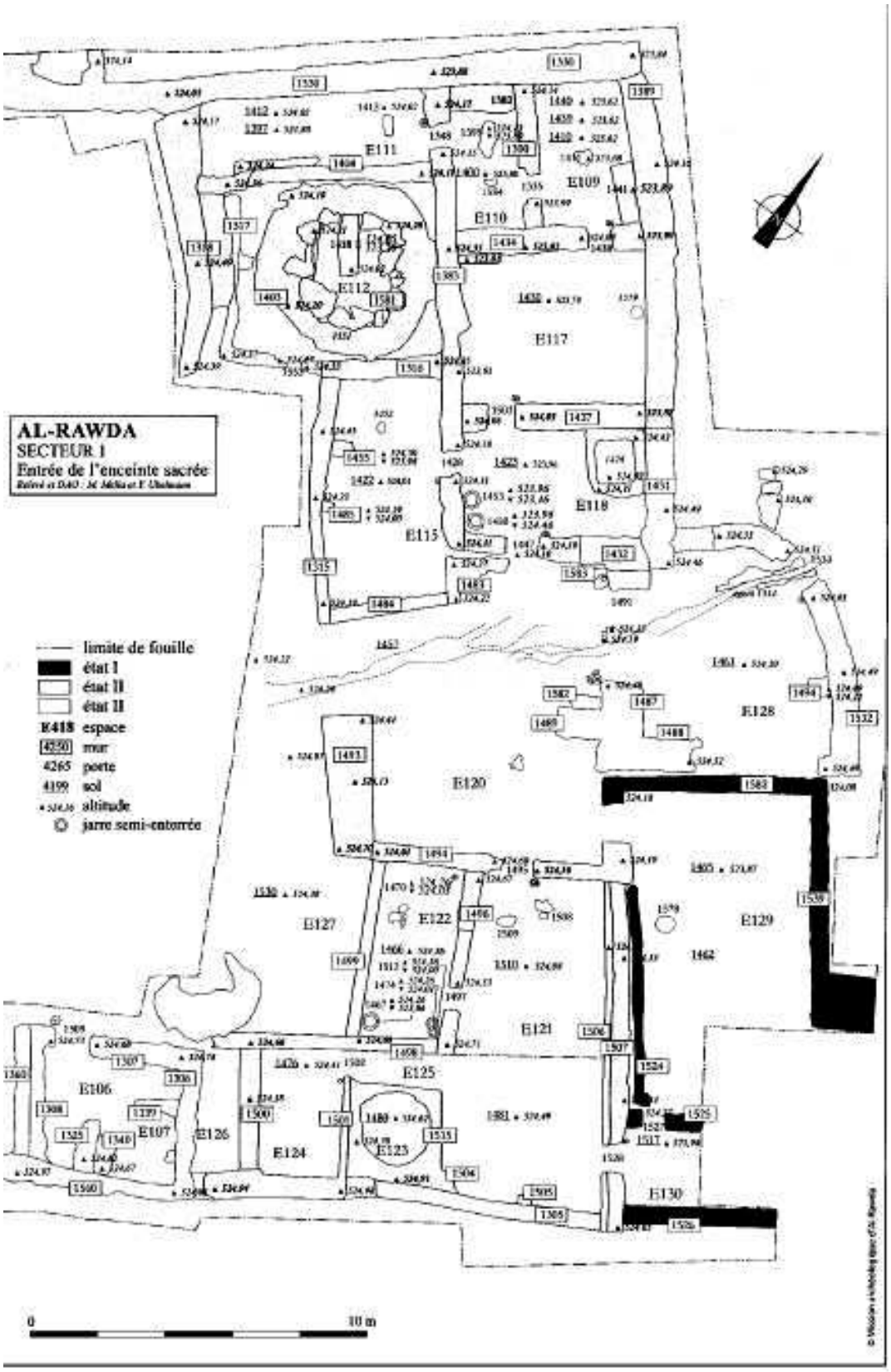


Figure 2.15 *Plan schématique de l'enceinte sacrée, secteur 1.*

5.1.3.ii. Secteur 2a : le rempart à l'ouest

Cette zone a été choisie du fait de la présence du rempart qui se prolonge vers le nord avec une largeur constante de 2,55 m. Celui-ci est construit en briques crues sur soubassement en pierre. Il est conservé sur six assises de briques crues rectangulaire (36 x 58 x 8-9 cm). L'objectif de la fouille était d'appréhender la construction du rempart avec ses installations spécifiques et ses éventuels remaniements. Le sondage ainsi défini permettait par ailleurs d'entrevoir les constructions *intra-muros* accolées au rempart (Figure 2.16).

Il apparaît clairement que le système défensif du site est concentrique et constitué au moins dans sa phase initiale d'un avant-mur, du rempart proprement dit, d'un premier et d'un second fossé (Quenet p. 24 *in* Castel *et al*. 2008).

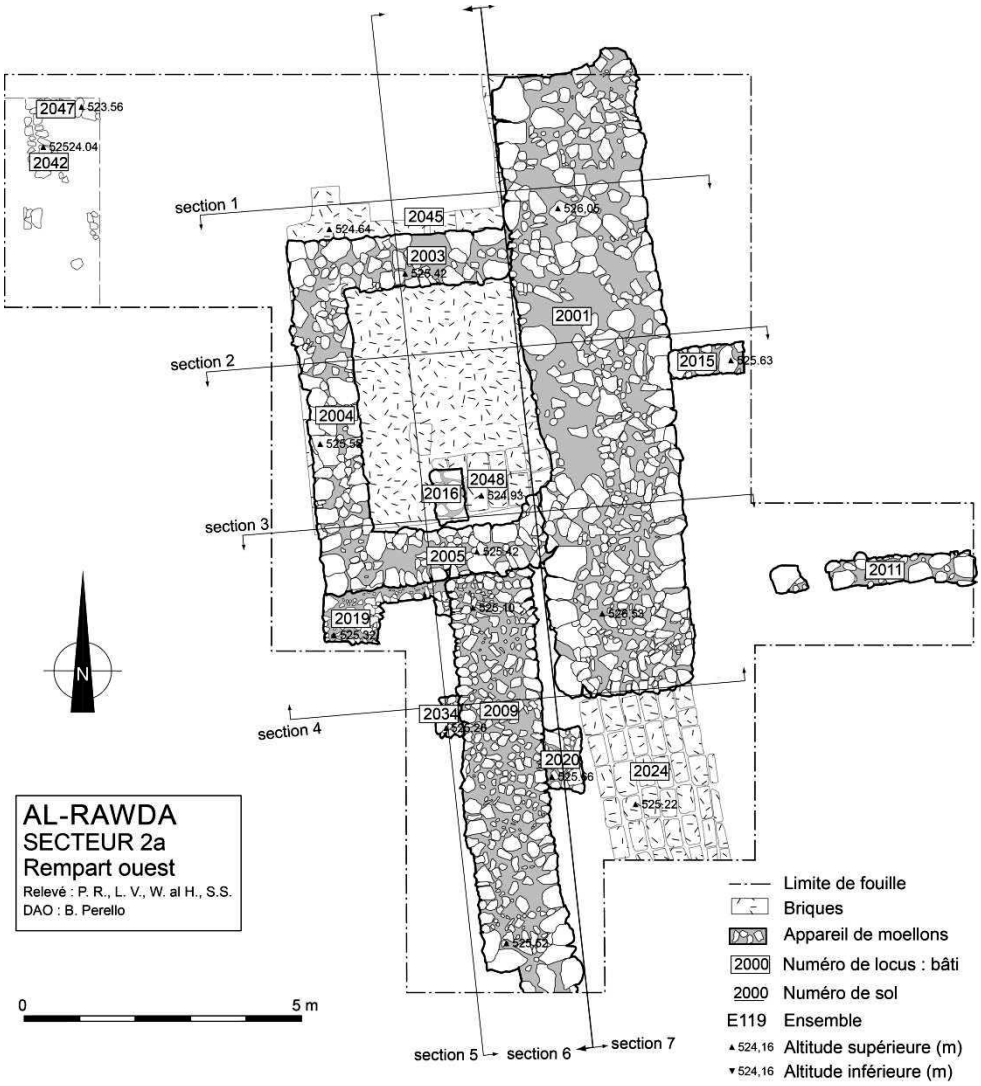


Figure 2.16 ***Plan de fouille de secteur 2a, rempart ouest.***

5.1.3.iii. Le secteur 2b: la porte nord de la ville

Le choix d'ouverture de ce secteur est d'étudier la porte de la ville. Ce secteur a été implanté au nord de la ville, où la porte est marquée en surface par une dépression assez

claire, orientée nord-sud et s'étendant sur une trentaine de mètres, les vestiges et où l'on peut observer un rempart en pierres. Ce rempart est construit de blocs très grands et doté, du côté intérieur d'un contrefort épais de 1,20 m à 1,40 m (Figure 2.17).

Sous la base de pierres du dernier rempart, les briques crues apparaissent du rempart du niveau inférieur (2113).

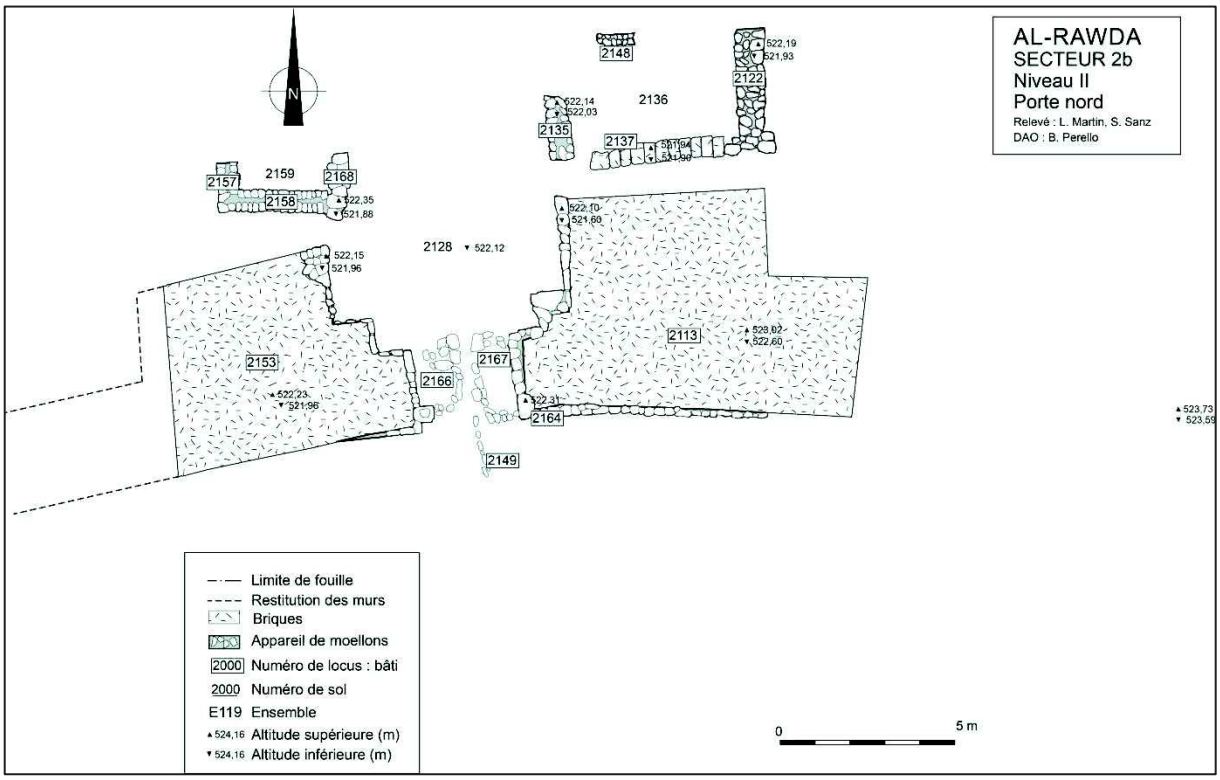


Figure 2.17 ***Plan de fouille de Secteur 2b, porte nord.***

5.1.3.iv. Le Secteur 2C

Ce secteur est localisé à l'est au niveau de l'enceinte qui entoure le Tell Al-Rawda, de la même manière que les secteurs 2a et 2b, implanté sur les vestiges affleurant du rempart (Figure 2.18, 2.19).

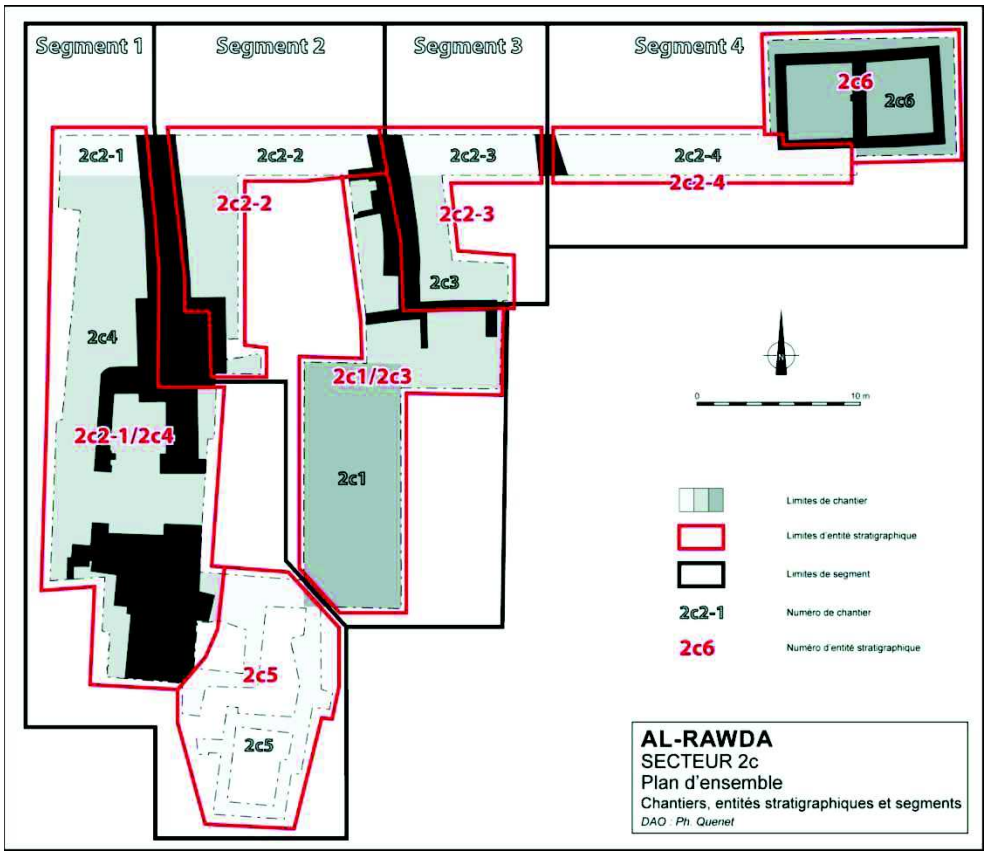


Figure 2.18 ***Délimitation des chantiers, des entités stratigraphiques et des segments dans le secteur 2c.***

La conception même du dispositif fait que les ouvrages de surface qui structurent l'ensemble délimitent des segments indépendants les uns des autres sur un plan stratigraphique et jouent, à ce titre, comme autant de murs étanches. D'ouest en est, les éléments constitutifs de ces segments sont les suivants :

1. bâti ordinaire *intra-muros*, voie C3, rempart/porte ;
2. rempart, espace intermédiaire, avant-mur ;
3. avant-mur, premier fossé, massif ;
4. massif, second fossé, bâti *extra muros*.

En effet, il apparait clairement que le système défensif du site est concentrique et constitué d'un avant-mur, du rempart perpendiculaire et deux fossés.

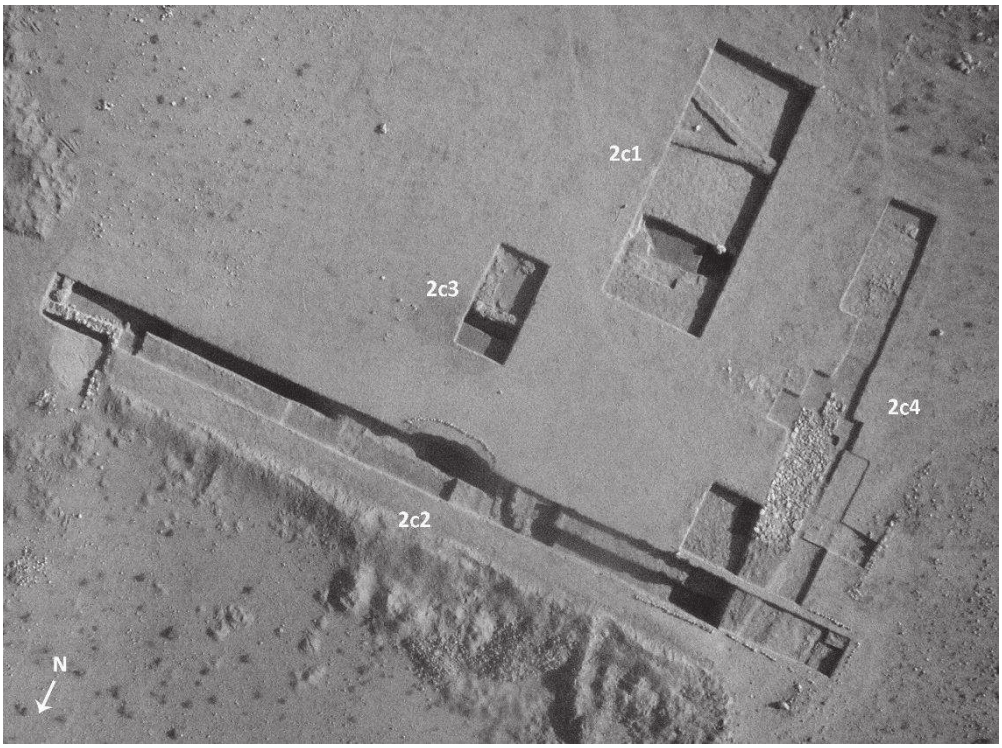


Figure 2.19 ***Vue générale du secteur 2c à la fin de la campagne 2005 (photo prise d'un cerf-volant) cliché : S. Sanz.***

5.1.3.v. Le secteur 4 : sud-ouest du site, quartier d'habitation

Comme dans les autres secteurs le choix d'implantation était lié aux observations faites en surface. Ce secteur est dans une zone d'habitation. La partie occidentale du tell est particulièrement favorable au dégagement de maisons d'habitation dont les plans sont visibles en surface avant fouille. D'autre part, les constructions touchent l'enceinte donnant l'espoir de comprendre les relations entre le tissu urbain et le rempart.

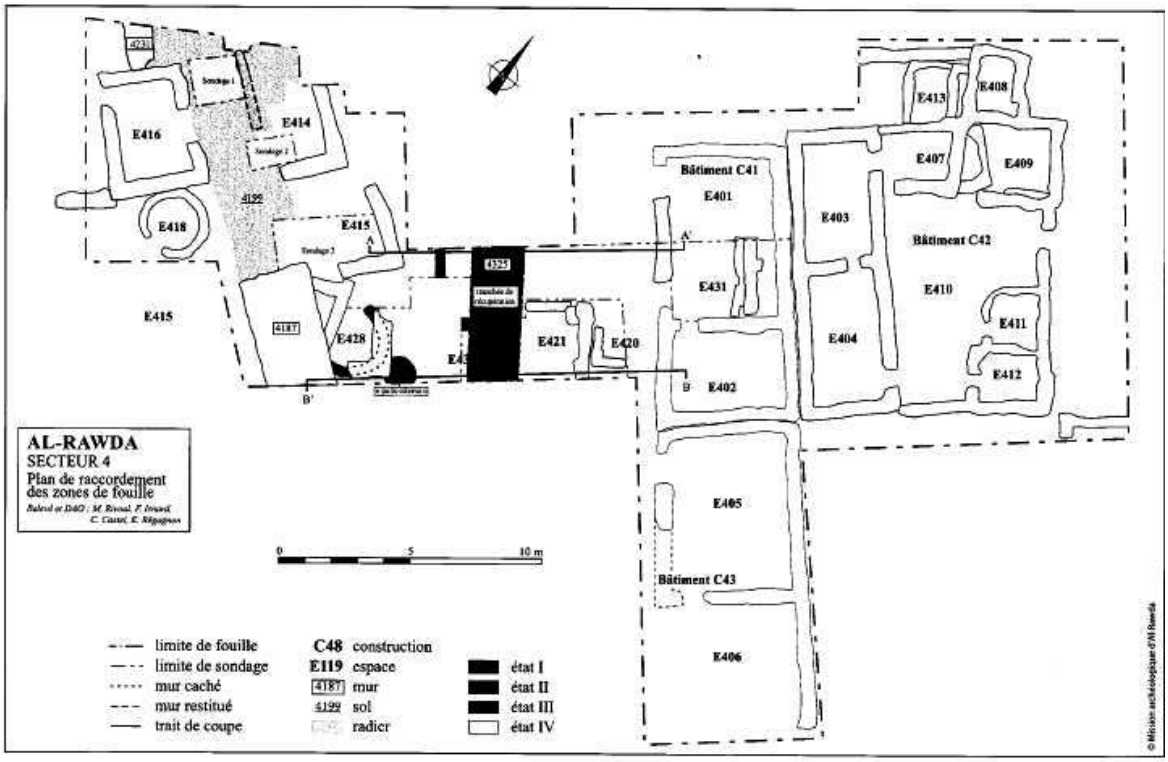


Figure 2.20 ***Plan schématique du secteur 4.***

La surface fouillée dans cette zone est de 400 m^2. Trois bâtiments différents y ont été complètement dégagés: C41 à l'Ouest, C43 au Sud et C42 au Nord (Figure 2.20).

Les ensembles C41 et C42 contiennent deux niveaux d'occupation du Bronze ancien IV final, ces niveaux sont séparés par un hiatus. Deux états d'édifices différents ont été identifiés dans le bâtiment C42 pour le dernier niveau d'occupation. Ils correspondent à des travaux de restauration et à une nouvelle répartition des pièces. Enfin, quelques fosses et trous de poteaux peu profonds d'un niveau sub-contemporain ont légèrement endommagé le dernier état de construction de chacun des bâtiments (Figure 2.21).

Ces bâtiments antiques sont considérés comme des unités d'habitation. Ils étaient construits en murs de briques de terre crue, qui ont quasiment disparus et dont on ne voit plus que le soubassement de pierre. La découverte de bases ou de calages de poteaux permet de repérer aisément les salles couvertes.

Figure 2.21 ***Photographie arienne du secteur 4 pris avec un aréomodèle en novembre 2007 cliché : O.Barge.***

5.1.3.vi. Le secteur5

Ce secteur se trouve dans l'espace central ayant une forme ovale et il est entouré d'une voie où convergent les rues de la partie septentrionale de l'agglomération (Figure 2.22).

À partir des travaux dans ce secteur, on peut distinguer deux bâtiments qui diffèrent, soit par leur orientation, soit par les dimensions de leurs murs (Figure 2.22).

Figure 2.22 ***photographie des bâtiments C50 (vers l'ouest) et C51 (vers l'est) séparés par E518 (vue du nord-est).***

I.5.1.3.vi.1 Le bâtiment C51

Il est constitué d'un espace dallé (ensemble 501) défini par trois murs perpendiculaires (5009, 5025 et 5027) de belle facture et un autre mur (5029). Ce mur prolonge vers l'est le locus 5025. Les dimensions d'origine de l'espace 501 sont de 6 m par 4 m.

Le mur 5029, prolonge le mur 5025, en direction de l'est. Il est composé de grands blocs plats d'une largeur de 0,60 m et a été mis au jour sur une assise. La porte que l'on peut observer entre les murs 5025 et 5029, faisait 1 m de large environ. Elle ouvre sur l'espace dallé et ne possède pas de seuil.

I.5.1.3.vi.2 Le bâtiment C50

Ce bâtiment est différent par rapport au bâtiment précédent par son orientation et ses murs moins épais. On peut y distinguer trois espaces (Figure 2.23).

Le premier espace, E502 est limité par trois murs perpendiculaires (5024, 5032 et 5033). La limite occidentale est se trouve en dehors de la zone de fouille.

Le deuxième, E503, est délimité par trois murs: les murs 5032, 5033 et une portion de mur (5024) que prolonge vers le sud un dallage localisé de petites pierres et de galets, mêlées de briques crues et de tessons de poterie (5041).

Le troisième espace, E504, dessine l'angle nord-est. Il est composé de deux murs qui sont des murs perpendiculaires (5033 et 5034). Le sol (5038) dans cette espace est constitué de terre battue mêlée de gravillons et graviers calcaires décomposés. Il y a aussi un bloc de basalte fixé dans le sol.

Dans ce secteur, les archéologues ont trouvé des «têtes d'araire » en pierre, de nombreux tessons de poterie du Bronze ancien IV final et des os d'animaux.

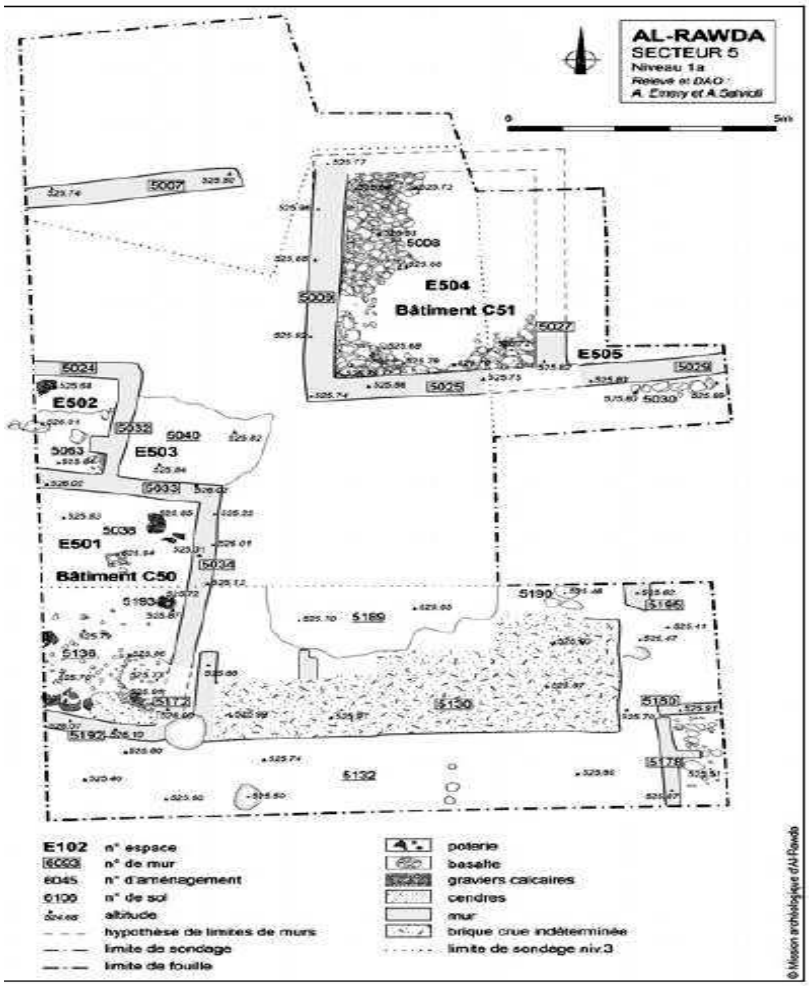


Figure 2.23 ***Plan général du dernier état d'occupation du centre de la ville, niveau architectural 1.***

5.1.3.vii. Le secteur 6 un carrefour au nord-ouest de la ville

Ce secteur se trouve au carrefour entre deux grandes rues, la rue circulaire C2 et la rue radiale R3 (Figure 2.24). Le but de la fouille dans cette zone est d'étudier la stratigraphie d'une intersection de rues et de déterminer la nature de la voirie et le tissu urbain depuis l'origine de la ville. La largeur de la rue circulaire est de 3 m à cet endroit et elle est la deuxième voie circulaire en partant du centre de la ville. La rue radiale à une largeur de 3,60 m. Elle relie la grande porte au nord-ouest et le centre de la ville.

Dans ce secteur, trois niveau d'occupation ont été dégagés et ils sont décrits depuis le niveau le plus récent jusqu'au niveau le plus ancien (Figure 2.25).

I.5.1.3.vii.1 Niveau 1

La rue radiale R3 qui traverse le secteur d'est en ouest et confinée au nord par les bâtiments E607, E608 et E609. On trouve trois espaces délimités par le mur 6017, l'espace dont le centre est carré, entouré par les murs 6013, 6014 et 6015 et pour le mur nord on observe une petite porte de 40 cm de large.

Au sud-ouest du secteur, a été dégagé un bâtiment, C60. Cette construction se compose de trois espaces (E601, E602, E603).

Au sud-est de ce secteur se trouve une autre habitation constituée de trois pièces (E604, E605, E606).

I.5.1.3.vii.2 Niveau 2

La voie radiale R3 est similaire à ce que l'on trouve dans le niveau 1. Elle est limitée par un mur, 6041, au nord et un mur, 6055, au sud.

Les trois espaces (E613, E614, E615) au nord de la rue sont ceux déjà identifiés au niveau 1. Leur largeur est de 50 cm.

Au sud-est du croisement des deux rues au niveau 2, les contours du bâtiment C61 sont identiques à ceux de niveau 1. Le seuil de l'entrée (6045) de l'espace E604 est construit de brique crue.

I.5.1.3.vii.3 Niveau 3

Les rue R3 et C2 existent toujours au niveau 3. Le sol de la rue R3 est constitué de terre très compacte.

Au nord du secteur, la rue radiale placée au niveau 3 montre quelques modifications. Au niveau du sol 6084, une très large fosse, 6080, apparaît.

Figure 2.24 ***Rue radiale R3 au niveau 3 (6082).***

Au sud-ouest, l'espace E612 est délimité par le mur 6055 qui est constitué de briques crues. La hauteur de brique est d'une douzaine de centimètres pour une largeur de 0,35 m.

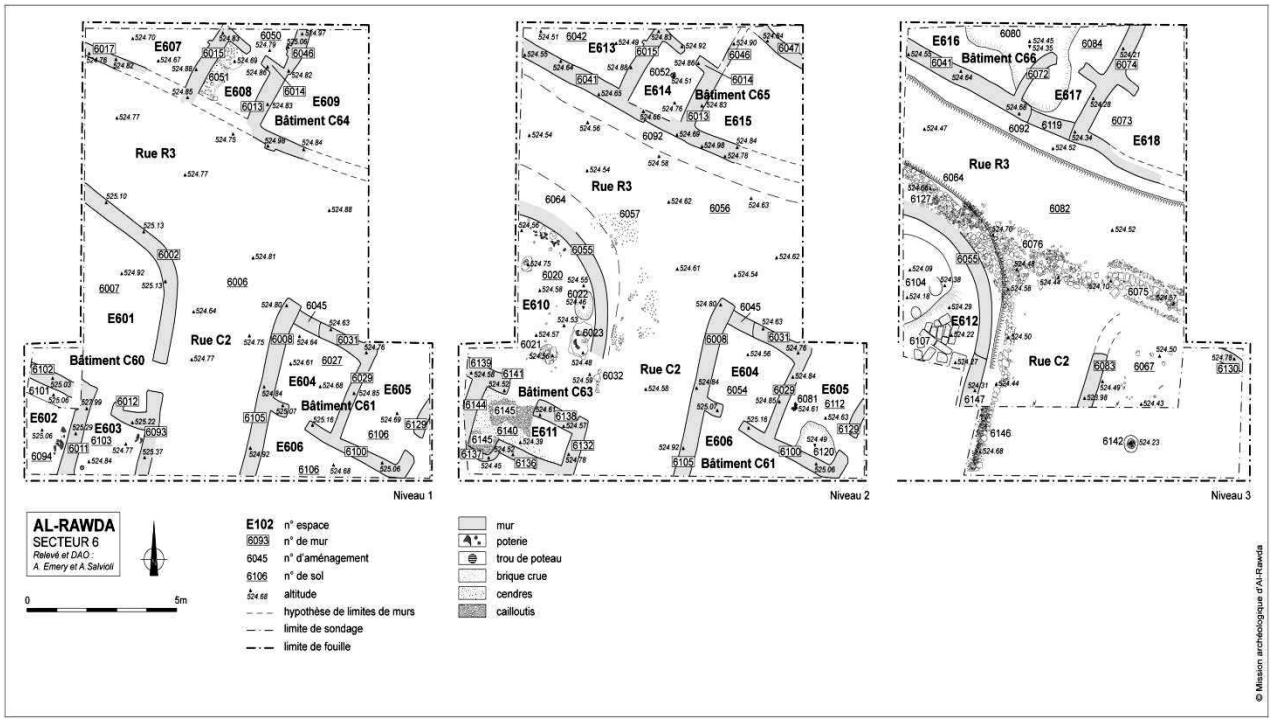


Figure 2.25 ***Secteur 6 plan des niveaux 1 à 3.***

5.1.4. L'étude céramologique

Les tessons et les fragments de poteries proviennent soit de la surface du site, soit des sondages. Les principaux résultats sont donnés ci-dessous.

5.1.4.i. Matériaux

L'étude macroscopique des pâtes montre que la plupart des poteries a été réalisée avec une argile fine. Le couleur de 65 % des tessons est très hétérogène d'après les tranches. Les couleurs remarquées sont le rouge-orangé, le gris, le beige et parfois le vert. Par contre 24 % des tessons montrent une céramique de couleur uniformément orange. Enfin 10 % des tessons sont blancs, de calibre moyen à gros et formés de fragments calcaires.

5.1.4.ii. Morphologie

Les principales formes de poterie observées sur le site sont des gobelets, des bols, des jattes, des jarres. La céramique culinaire compte des marmites à panse globulaire avec ou sans col. Par ailleurs, l'ensemble des tessons forme un corpus relativement homogène.

5.1.4.iii. Datation

Pour étudier la datation des niveaux d'occupation du site de tell Al-Rawda, les archéologues se sont fondés sur la comparaison avec des sites de référence comme Ebla, Hama, Qatna et Taynat.

Ces études ont permis de dater les niveaux d'occupation sur le site intra-muros d'Al-Rawda de la deuxième moitié du troisième millénaire (2500-2000 av. J.C.), ce qui correspond à peu près au Bronze ancien IV syrien.

En ce qui concerne l'abandon du site, les datations radiocarbones indiquent une fin de l'occupation vers 2200 avJ.-C. Ce résultat se fonde également sur l'absence, dans les céramiques d'Al-Rawda, d'un type de jatte montrant une lèvre moulurée à trois bourrelets à l'extérieur qui est particulière à la toute fin du Bronze ancien IV à Hama (niveau J 1) et à Ebla.

5.2. Tell Sh'airat

5.2.1. Localisation du site

Tell Sh'airat, qui est situé dans l'ouest de la Syrie à 32 km au sud-est de la ville moderne de Homs et à environ 100 km au sud-ouest de Tell Al-Rawda à la périphérie occidentale des steppes désertiques syriennes, est le site le plus au sud de la région couverte par le projet ANR (Figure 2.26).

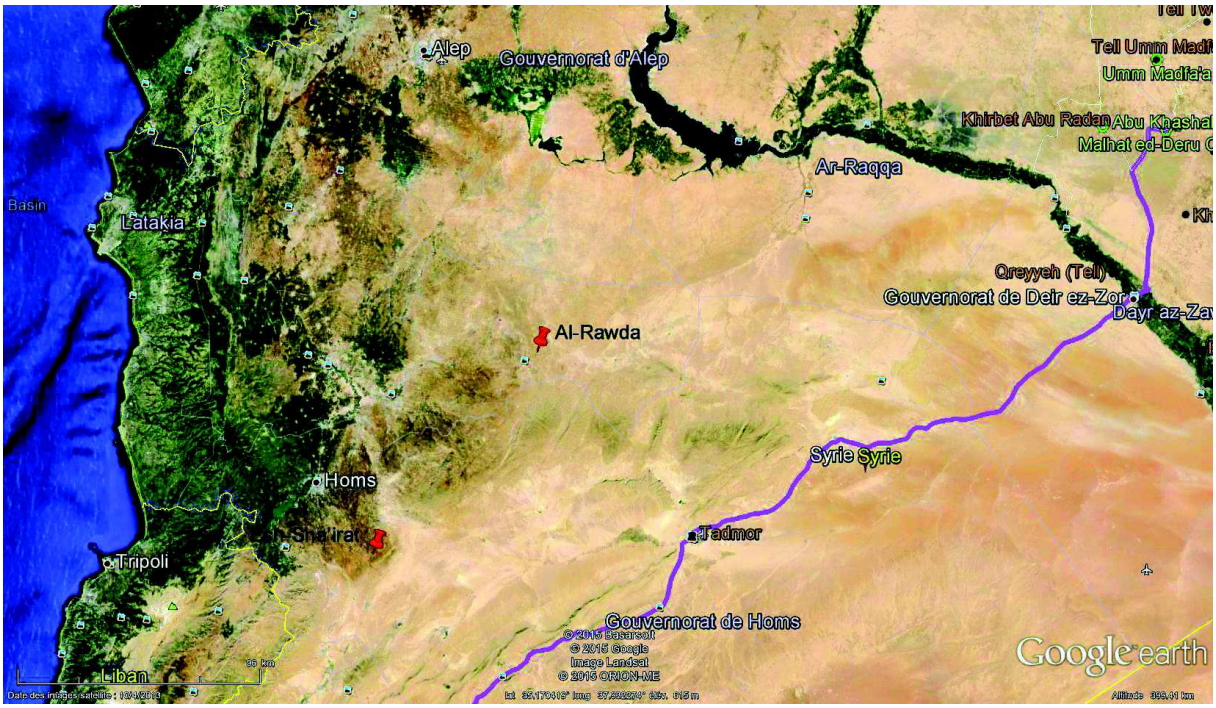


Figure 2.26 ***Localisation du site Sh'airat.***

Le site antique se trouve près du village moderne de Sh'airat, où les habitations jouxtent au nord-ouest le rempart de la ville-haute (Figure 2.27). Sh'airat est également connue pour sa base militaire voisine.

Figure 2.27 ***Photo aérienne de Sh'airat (source: Google-Earth).***

5.2.2. Le milieu géographique et climatique

La géographie de cette région est de type Shamiyeh (le désert syrien) et se situe au niveau de l'isohyète de 200 mm par an. Elle se trouve à environ 40 km à l'est de la rivière de l'Oronte. Cette région est habituellement cultivée avec de l'orge et des amandes.

Généralement le milieu de cette région ressemble à celui de tell Al-Rawda, mais en moins aride en raison de la proximité de l'Oronte (Figure 2.28).

Figure 2.28 ***Paysages du site Sh'airat: à gauche une vue de l'ouest du tell ; à droite une vue du nord-est (photo prise par Veronika Kudlek, octobre 2010).***

5.2.3. Contexte archéologique

La première exploration du tell est due au comte du Mesnil du Buisson et date de l'entre-deux-guerres. Plus récemment, l'étude de ce site a été reprise par Michel Al-Maqdissi, directeur des fouilles archéologiques en Syrie.

Pendant les travaux du comte du Mesnil du Buisson, ont été effectués plusieurs petits sondages dans le centre de la ville. Des couches brûlées et des cendres ont été observées. Les tessons trouvés ont été datés du troisième millénaire av. J.C. Précisément, la première fondation de la ville aurait eu lieu vers 2500 a.v. J.C. et la construction serait achevée à la fin du troisième millénaire av. J.C. (entre 2200-2100 av. J.C., Du Mesnil du Buisson, 1930).

La superficie du site est de 25 ha. Il est entouré d'une enceinte sur soubassement de pierre de 600 m de diamètre encore bien visible en surface (Figure 2.29). La partie supérieure du tell a été utilisée comme un cimetière au siècle dernier. Environ 45 m vers le sud-est du centre de l'ancienne agglomération se trouve un petite monticule à une hauteur d'environ 3 m, avec un rayon d'environ 17 m.

Figure 2.29 ***Mur massif format le rempart supérieur (photo prise par Veronika Kudlek, octobre 2010).***

Le matériel prospecté à la surface est homogène, attribuable au Bronze ancien IV et comparable à celui mis au jour à Tell Al-Rawda et Tell Khirbet Al-Qasr un autre site étudié par la Mission d'Al-Rawda. Le site se compose d'un tell principal de forme plutôt ovale entouré de fortification défensive et d'une ville basse (Al-Maqdissi, 1995).

En 2004, la direction générale des Antiquités et des Musées a fait plusieurs travaux de prospection archéologique et topographique préambule au commencement de travaux de fouille commencés en 2007 et continués jusqu'en 2009. Les travaux de fouille se sont concentrés dans la partie sud de la ville haute et sur l'enceinte du côté est de la ville. Plusieurs petits sondages ont été aussi faits à l'extérieur de la ville haute.

Les fouilles effectuées dans la ville haute ont permis de découvrir des petites maisons qui sont formées de fondations de pierres surmontées d'assises de brique crue. Quelques gros bâtiments ont été déterminés mais leur identité n'a pu être reconnue.

5.3. Tell Malhat Ed-Deru

5.3.1. Localisation du site

Malhat Ed-Deru (Kherbet Malhat) se trouve à un peu moins de 70 km de Der ez-Zor la ville la plus proche au nord.

De nombreuses villes circulaires y ont été listées (Tell Muazzar, Tell Mahrum, Tell Metjaha entre autres). Pour ce territoire, le site de Malhat Ed-Deru est le plus méridional d'entre eux (Castel et Meyer, 2009).

Le territoire administré par Malhat Ed-Deru est limité politiquement au nord par la zone d'influence de Tell Muazzar et, géographiquement, par un no man's land, une sorte de zone tampon qui s'étend du sud au sud-ouest d'Umm Madfa'a sur une dizaine de kilomètres. Au sud, il est limité par le désert au-delà duquel la vallée de l'Euphrate apparaît (Quenet , 2013) (Figure 2.30).

Figure 2.30 ***Localisation du site de Malhat Ed-Deru.***

5.3.2. Le milieu géographique

La première et la seule mission de prospection dans la microrégion de Tell Malhat Ed-Deru s'est déroulée entre le 25 août et le 16 septembre 2010.

Généralement le territoire de Tell Malhat Ed-Deru se divise en deux zones principales à propriétés très différentes. Le site d'étude se trouve aux frontières de ces deux zones (Figure 2.31).

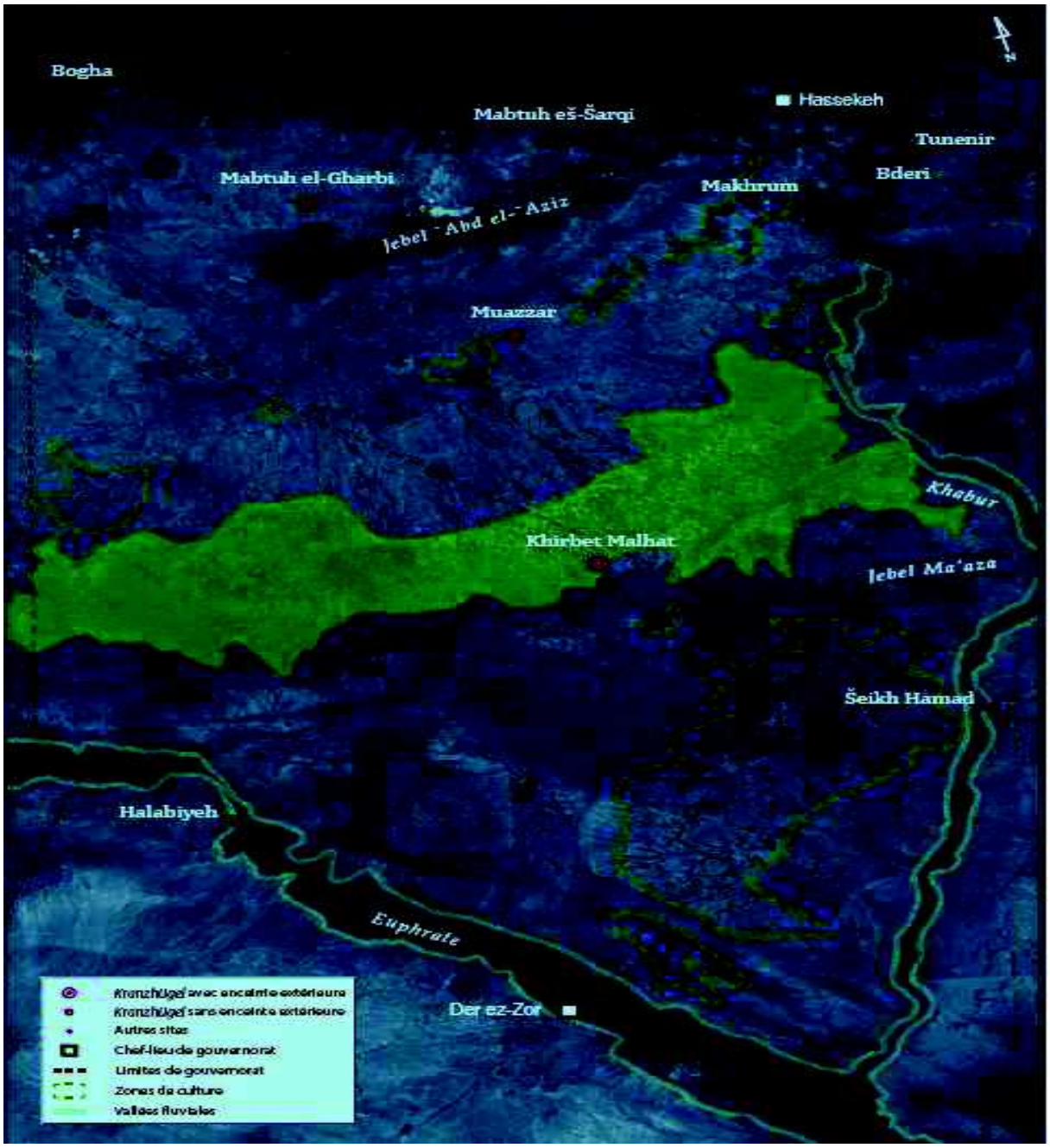


Figure 2.31 ***Malhat Ed-Deru (Khirbet Malhat) dans son environnement (image Landsat, 2001).***

La partie nord du territoire est cultivée grâce à un système d'irrigation gravitaire à partir de retenues d'eau artificielles alimentées par des puits (Figure 2.32).

Figure 2.32 ***Champs découpés en parcelles irrigables près de Malhat Ed-Deru et canal d'irrigation le long d'un chemin (photos mission archéologique Malhat Ed-Deru).***

Par contre, dans la partie au sud-est s'étend un désert incliné vers le nord nord-ouest (Figure 2.33). Cette partie est affectée par une sécheresse très marquée.

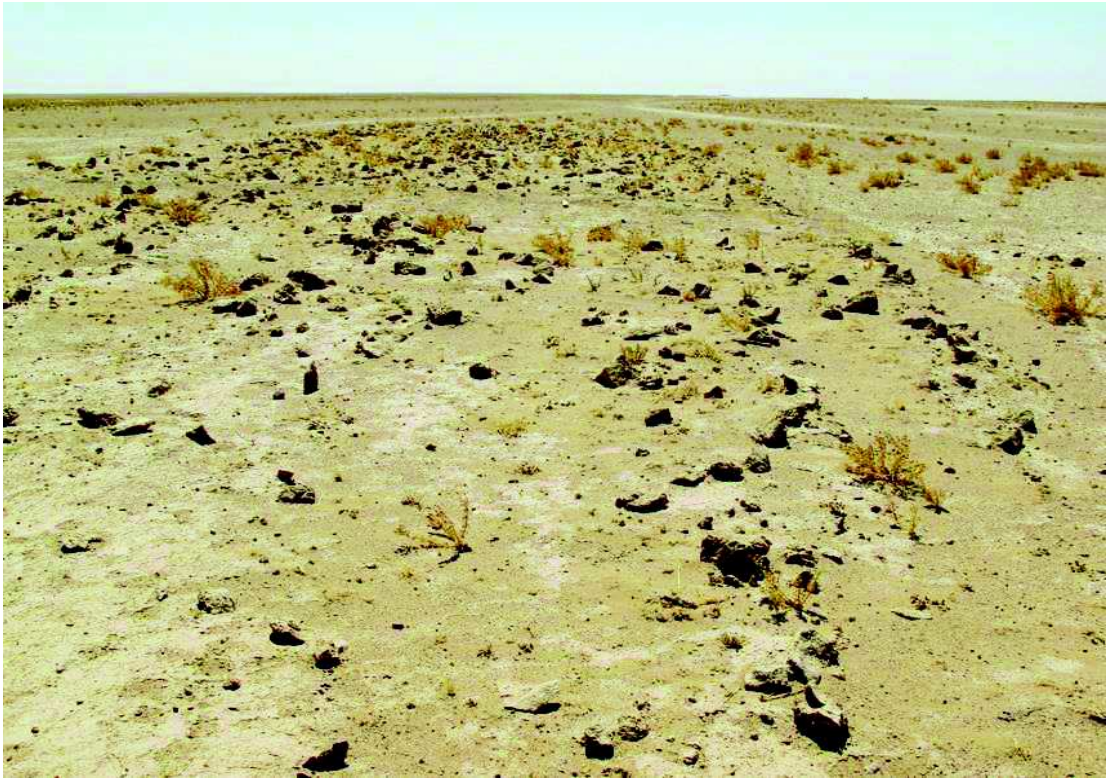


Figure 2.33 ***Paysage du désert au sud de Malhat Ed-Deru (photos mission archéologique de Malhat Ed-Deru).***

Cependant, le réseau hydrographique, relâché et discontinu, comprend plusieurs oueds orientés sud-nord.

Enfin, au sud-ouest, le paysage présente des caractères intermédiaires entre les deux zones précédentes.

La géologie de la région correspond à une roche unique, des grès et conglomérats pliocènes. La pédogenèse conduit à la formation de sols sub-arides dans lesquels se développent différents faciès d'accumulation carbonatée. Au nord, ils sont recouverts par des formations limoneuses très homogènes qui constituent le terroir cultivé.

5.3.3. Contexte archéologique

Globalement, le site de Malhat Ed-Deru n'a probablement pas souffert de détériorations majeures. Il est toujours protégé par sa situation excentrée dans un milieu difficile. Bien plus que d'autres tells, il est resté à l'abri de la pression démographique et économique qui a substantiellement modifié le paysage de la Syrie dans le dernier demi-siècle.

Ce site est un tell de 650 m de diamètre environ dans le sens nord/sud et de 550 m dans le sens est/ouest (Figure 2.34). Sa forme est loin d'être circulaire avec une superficie de 31 ha environ. On distingue les deux zones planes (villes haute et basse) des deux enceintes (intérieure et extérieure). La ville haute s'élève de plus de 10 m au-dessus de la plaine environnante. Son enceinte extérieure, en contrebas, a une forme sub-rectangulaire et a pu enfermer une ville basse.

À la différence d'un bon nombre d'autres villes circulaires, à la fois l'enceinte extérieure et l'enceinte intérieure sont bien marquées dans la topographie du site. La première est matérialisée par l'anneau périphérique, qui enserre une bande de terrain plan, et la seconde par une crête bordant le tell central, plan lui aussi en son centre. Les deux enceintes sont entaillées par des dépressions qui correspondent vraisemblablement à des portes.

En deux points, les assises du rempart apparaissent négligées : dans les dépressions 11 et 7 affleurent respectivement, un alignement de moellons en calcaire et un empierrement de moellons en basalte (Figure 2.35).

Figure 2.34 ***Image satellite du site de Malhat Ed-Deru.***

On peut voir nombre d'autres dépressions ou portes, plus ou moins marquées qui soulignent l'anneau extérieur. Pour les dépressions 1, 3 à 6 et 8 à 12, il s'agit de vraies trouées alors que les dépressions 2 et 7 sont moins encaissées; toutes, néanmoins, ouvrent un passage vers la ville basse depuis la plaine (Figure 2.35)

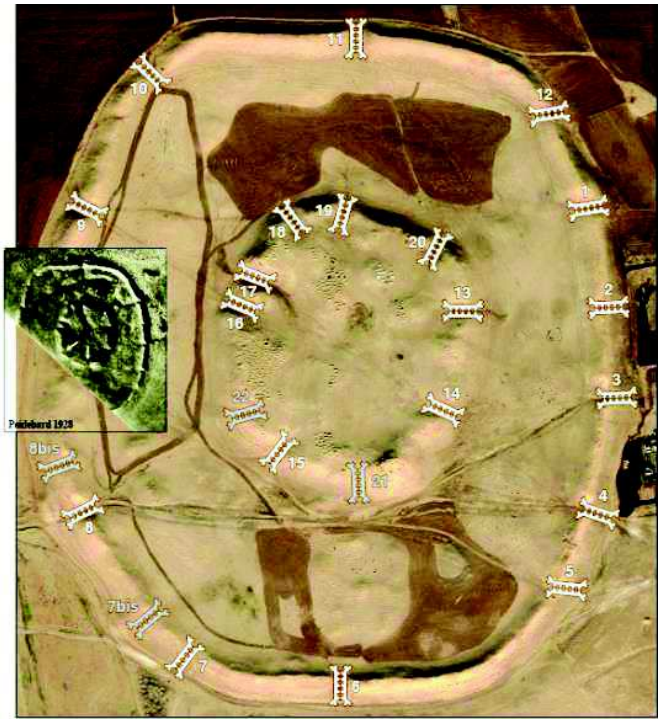


Figure 2.35 ***Malhat Ed-Deru Prospection topographique. Dépressions observées sur le terrain ou restituées (Quenet ,2013).***

La céramique ramassée à la surface de Malhat Ed-Deru a été divisée en plusieurs familles: formes ouvertes (bols et jattes), formes fermées (petites, moyennes et grandes jarres), bases ou autres (décors, anses, etc...). Quoique la céramique n'ait été que partiellement étudiée, il apparaît que le matériel ramassé date dans sa majorité du IIIe millénaire av. J.C. Les tessons les plus anciens reconnus jusqu'ici sont des céramiques ninivite V incisées et excisées et des poteries peintes de style Karababa.

Au sud-ouest de la ville haute, une concentration de tessons du IIe millénaire av. J.C. témoigne, après un long abandon, de l'existence d'un modeste établissement en bordure sud de la « ville haute ». Celle-ci a laissé sa marque dans la topographie sous la forme d'une petite hauteur couvrant le quadrant sud-est du tell central.

Dans la ville haute il y a de nombreuses tombes modernes qui ont été creusées un peu partout. Elles se répartissent en onze ensembles ou cimetières (Figure2 : 36). Leur emplacement est marqué par des briques ou des pierres (en calcaire ou en basalte), ou par des parpaings.

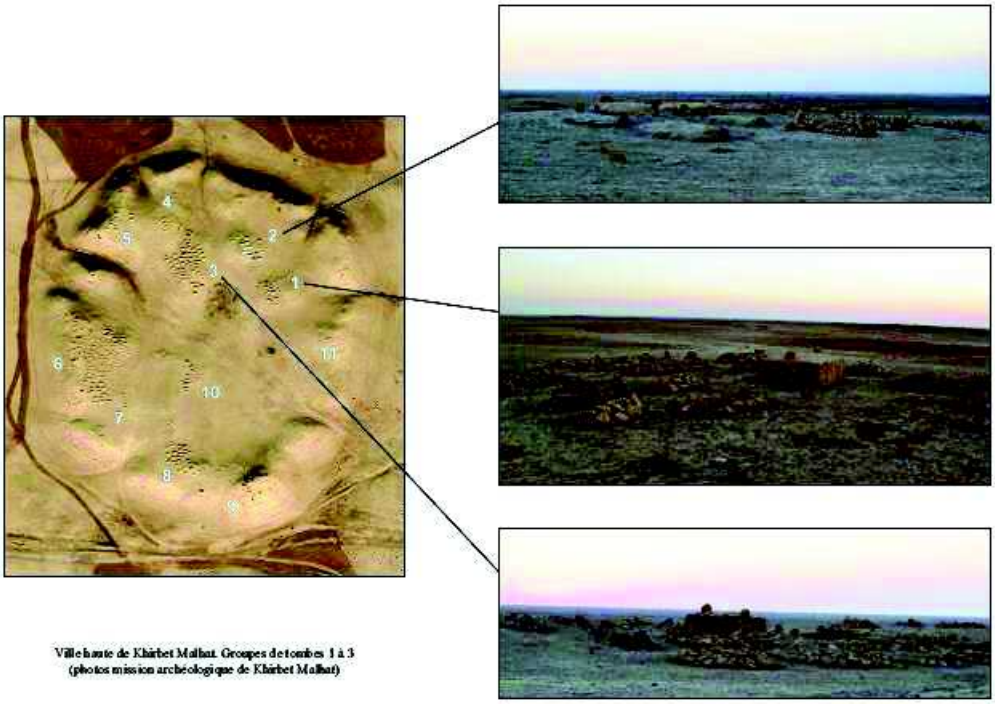


Figure 2.36 ***Les tombes dans la ville haute.***

6. Les études géophysiques

6.1. Tell Al-Rawda

Deux campagnes de prospection magnétique ont eu lieu sur le site (Gondet et Castel, 2004). Généralement, les conditions de mesure étaient bonnes, les vestiges du site sont faiblement enterrés et peu de perturbations d'origine anthropiques ont affecté le site suite à

son abandon. D'autre part, l'utilisation du calcaire pour construire les soubassements des bâtiments antiques apporte un contraste d'aimantation suffisant avec l'encaissant argileux pour obtenir des anomalies mesurables. Le terrain lui-même ne présentait pas de difficultés particulières, la majeure partie de la surface est plane et sans obstacle.

La seule limite à la prospection géophysique sur le tell d'Al-Rawda correspond à la présence d'un petit village moderne constitué d'une dizaine de maisons sur la partie sud-ouest du tell. La zone correspondante n'a pas été prospectée. Par ailleurs, au voisinage de ces maisons, les perturbations d'origine métallique sont nombreuses. Elles sont aussi dues à l'installation de lignes électriques soutenues par des pylônes en acier.

Il y a aussi des zones qui n'ont pas été prospectées, parce qu'elles se trouvent dans les secteurs en cours de fouille.

Les mesures ont été réalisées avec un magnétomètre Geometrics G858 monté en gradiométrie verticale. La cartographie a été réalisée profil par profil selon des carrés ayant 50 m de côté. La carte de gradient magnétique (Figure 2.37) est perturbée par de nombreuses fortes valeurs qui correspondent le plus souvent aux déchets métalliques, pylônes électriques, etc… La résolution de la carte s'en trouve réduite sur certaines zones, en particulier dans les carrés se trouvant au nord du hameau moderne.

La prospection magnétique effectuée a donné des résultats remarquables. Elle montre clairement le plan du site. De plus, sur certaines zones, elle donne des réponses précieuses aux questions particulières que se posaient les archéologues. Sans la cartographie magnétique, les archéologues n'observaient que quelques rares témoins des murs à l'affleurement qui ne permettaient pas de dresser un plan de la ville. La régularité même du plan obtenu confirme la contemporanéité relative des vestiges.

La carte magnétique obtenue met en évidence un vrai plan d'urbanisme pour lequel le bâti est souvent très dense et concentré au sein d'un espace délimité. Par ailleurs, la limite extérieure du tell correspondant à l'enceinte circulaire est bien marquée.

Les principaux résultats sont les suivant

- l'implantation est très régulière ;
- le plan d'urbanisme s'organise autour du centre selon un schéma circulaire, concentrique et radial ;
- le schéma urbanistique ne souffre quasiment pas d'exception sur toute la surface prospectée.

Ces caractéristiques ont conduit à l'hypothèse qui propose que le site d'Al-Rawda constitue une implantation au plan d'urbanisme préconçu (Gondet et Castel 2004). Par ailleurs, la carte gradiométrique conforte l'hypothèse selon laquelle la ville d'Al-Rawda a été

abandonnée trois siècles seulement après sa création, avant que le temps ait pu changer profondément le plan d'urbanisme original.

6.1.1. Le réseau principal

Le réseau principal est caractérisé par des rues larges et régulières et formé de rues circulaires et concentriques raccordées entre elles par des rues radiales.

Pour les rues circulaires, on peut distinguer trois rues principales. Il s'agit d'une rue centrale C1, d'une rue médiane C2 et d'une rue externe C3 (Figure 2.37). Ces rues sont bien observées sur presque tout le pourtour du site. On remarque aussi que les rues C2 et C3 sont discontinues et subissent des décalages jusqu'à une dizaine de mètres à certains endroits.

Quatre rues radiales remarquables sont identifiées sur le plan. Une rue R1 très large de direction est/ouest, puis en allant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, une rue R2 de direction nord/sud et une rue R3 de direction nord-ouest/sud-est. Enfin, une rue R4 apparaît, également de direction nord-ouest/ sud-est (Figure 2.37).

Les rues circulaires permettent d'accéder à toutes les parties de la ville et relient les rues radiales entre elles. Il semble de plus que C1 joue un rôle central dans l'organisation des déplacements intramuros.

Les rues radiales permettent la circulation presque jusqu'au centre du tell. Elles partent pour certaines des portes de la ville (avec certitude pour R1 et R2) et sont suffisamment larges pour faciliter la circulation et l'entrée dans l'agglomération.

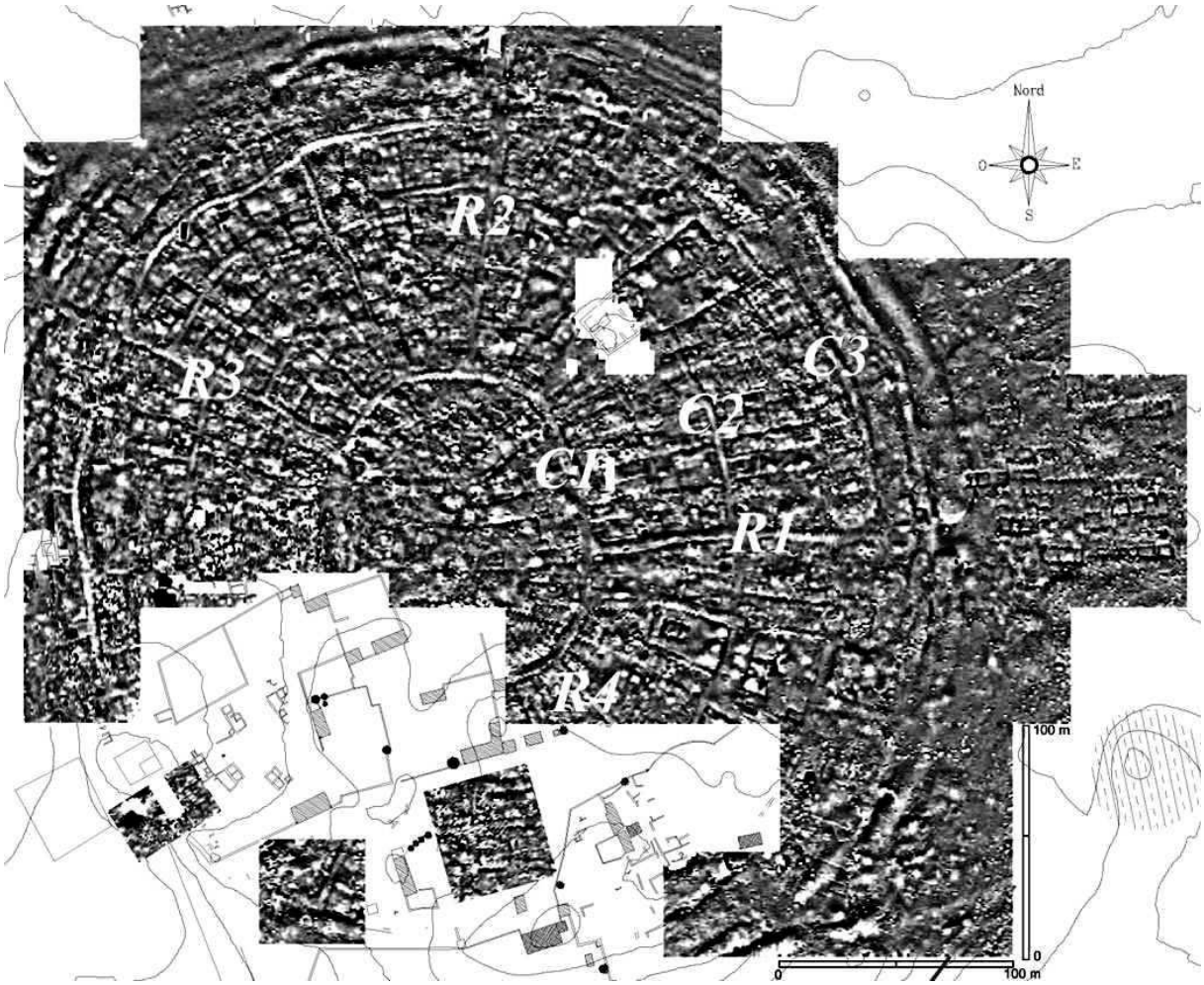


Figure 2.37 ***Carte de gradiométrie verticale de S.Gondet avec nomenclature des rues (Gondet et Castel, 2004).***

6.1.2. Le réseau secondaire

La carte montre également un réseau de rues secondaires mais dont les caractéristiques sont plus difficiles à établir vu les conditions de mesure et la résolution de la carte. Celui-ci est constitué de rues étroites qui permettent l'accès aux bâtiments.

6.1.3. L'organisation du bâti au sein du site

Les informations fournies par la carte géophysique indiquent que les constructions *Intra-muros* ont été implantées à partir d'un plan d'urbanisme. Le signe le plus évident réside dans l'orientation des vestiges. La carte montre aussi que la partition de la ville dessinée par le réseau de la voirie semble refléter une sectorisation de l'agglomération.

La cartographie à l'extérieur de la ville vers l'est montre la présence de plusieurs bâtiments de part et d'autre de ce qui pourrait être la continuité de la rue radiale R1 qui relie la porte orientale au quartier central. En plus, l'orientation des bâtiments et le module des

pièces sont similaires à ce qui s'observe dans certaines parties de la ville intra-muros (au nord par exemple). Mais les fouilles ont montrée qu'il ne s'agit d'une extension orientale de la ville en dehors du système de fortification, mais plutôt d'un quartier d'époque romain-byzantin (Castel et al, 2008)

La zone située au nord-ouest présente un tout autre plan d'occupation (Figure 2.38). Tout d'abord, les structures bornées ne sont pas en rapport avec une des portes de la ville et leurs orientations ne correspondent pas à celles des constructions *intra-muros* du secteur nord-ouest de la ville. Les aménagements très différents de ce que l'on peut observer à l'intérieur du site montrent que cette zone ne semble donc pas être inclue dans le plan d'urbanisme général de la ville. La partie orientale de cette zone présente un alignement presque nord/sud d'espaces rectangulaires fermés. Des tessons de céramiques datés de l'âge du Bronze ancien ont été ramassés. Ces céramiques pourraient indiquer la présence d'un habitat ou d'un lieu de stockage.

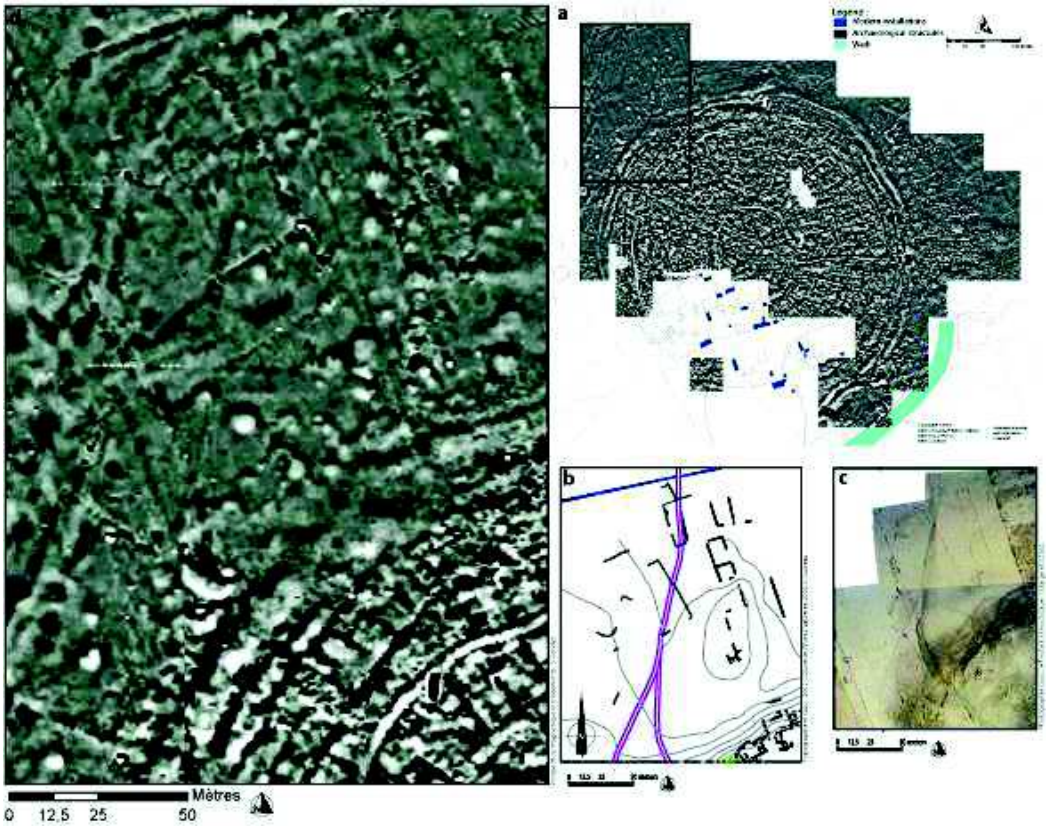


Figure 2.38 ***Images des prospections sur le site de Al-Rawda. Résultats des prospections topographiques, aériennes et magnétiques obtenues au nord-ouest de la ville intra-muros (Alarashi, 2010).***

6.2. Tell Sh'airat

Quatre campagnes de prospection magnétique du même type que pour Al-Rawda ont été menées en 2004, 2006, 2009 et 2010 sur le site de Sh'airat à la demande des autorités syriennes (Figure 2.39). La quasi-totalité de la ville fortifiée a été prospectée et l'organisation de la ville est bien mise en évidence grâce aux travaux conduits par Sébastien Gondet dans le cadre de la mission Al-Rawda. des compliments ont été apporté par Christophe Benech en 2009 et2010 également, (Figure2:40)(Benech, 2010). La carte magnétique a été complétée par moi-même dans la cadre de projet d'ANR Badiyeh.

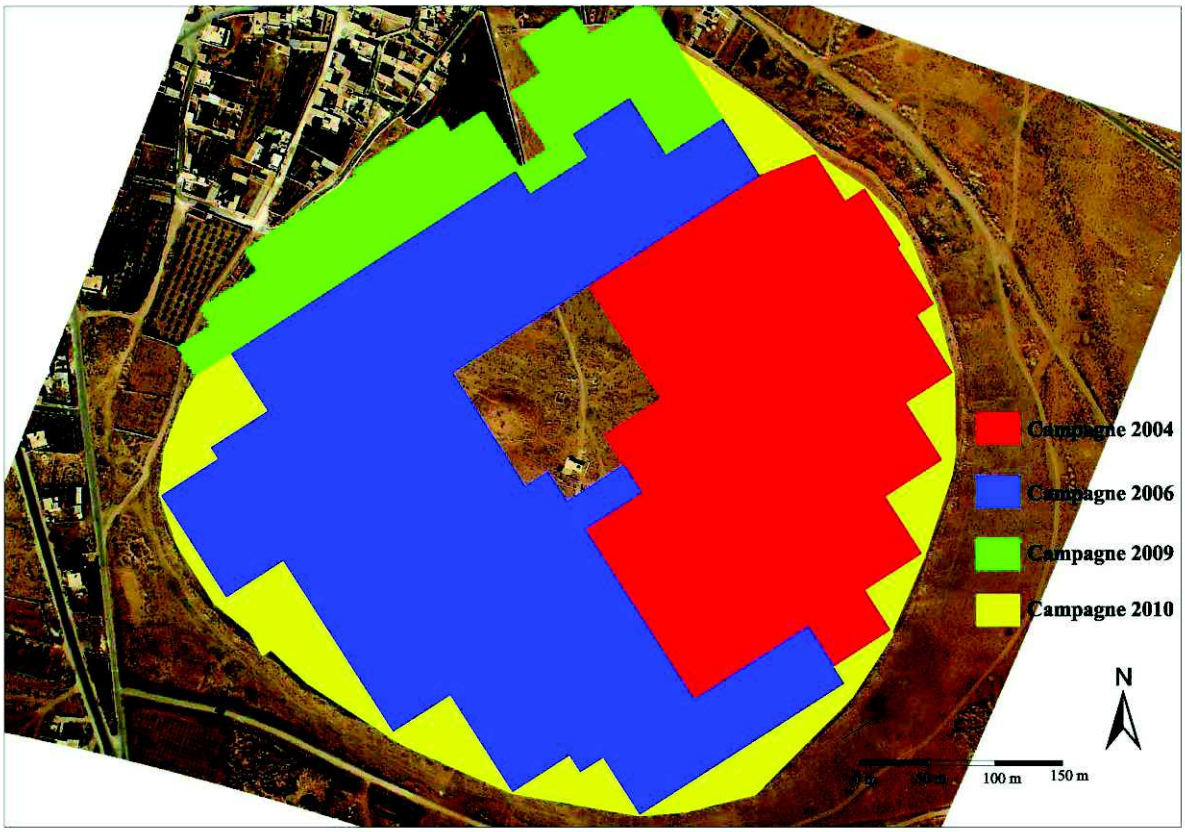


Figure 2.39 ***Localisation des quatre campagnes de prospection magnétique sur le site de Tell Sh'airat.***

La carte gradiométrique révèle l'existence de plusieurs rues circulaires entourant la ville, croisant des voies radiales qui vont des portes de la ville jusqu'au centre. Le tissu urbain qui s'organise autour de cette trame viaire semble assez dense et homogène. Il semble de plus qu'il y ait eu peu de perturbations dans le plan d'ensemble de la ville, les vestiges détectés présentant souvent un plan assez net sans indice de remplois ou de modifications.

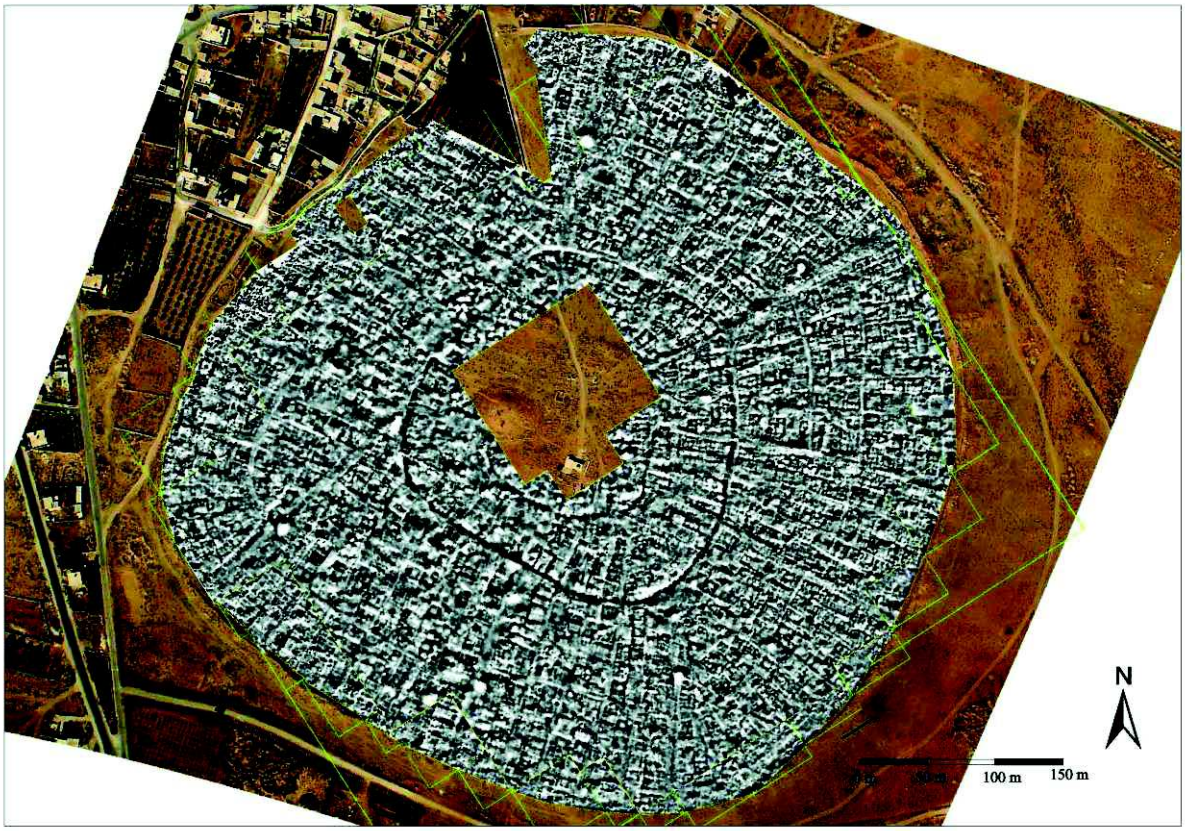


Figure 2.40 ***Carte de gradiométrie verticale (campagnes de 2004, 2006, 2009 et 2010) recalée approximativement avec la photo aérienne (Benech, 2010).***

6.3. Tell Malhat Ed-Deru

Aucune campagne géophysique n'a été réalisée avant celle de notre laboratoire en 2010.

6.4. Mari

En 2001 et 2002 Yves Gallet avec Armand Galdeano et Gauthier Hulot ont effectué une campagne de mesures magnétiques sur le Tell Hariri(l'ancienne Mari) Mari en utilisant un gradiomètre à pompage optique. La carte de gradiométrie a aidé à mieux comprendre mieux le plan de la ville qui est construit selon une organisation rayonnante (Figure 2.41). Elle montre deux remparts entourant la ville intérieure et sa couronne (Butterlin, 2010).

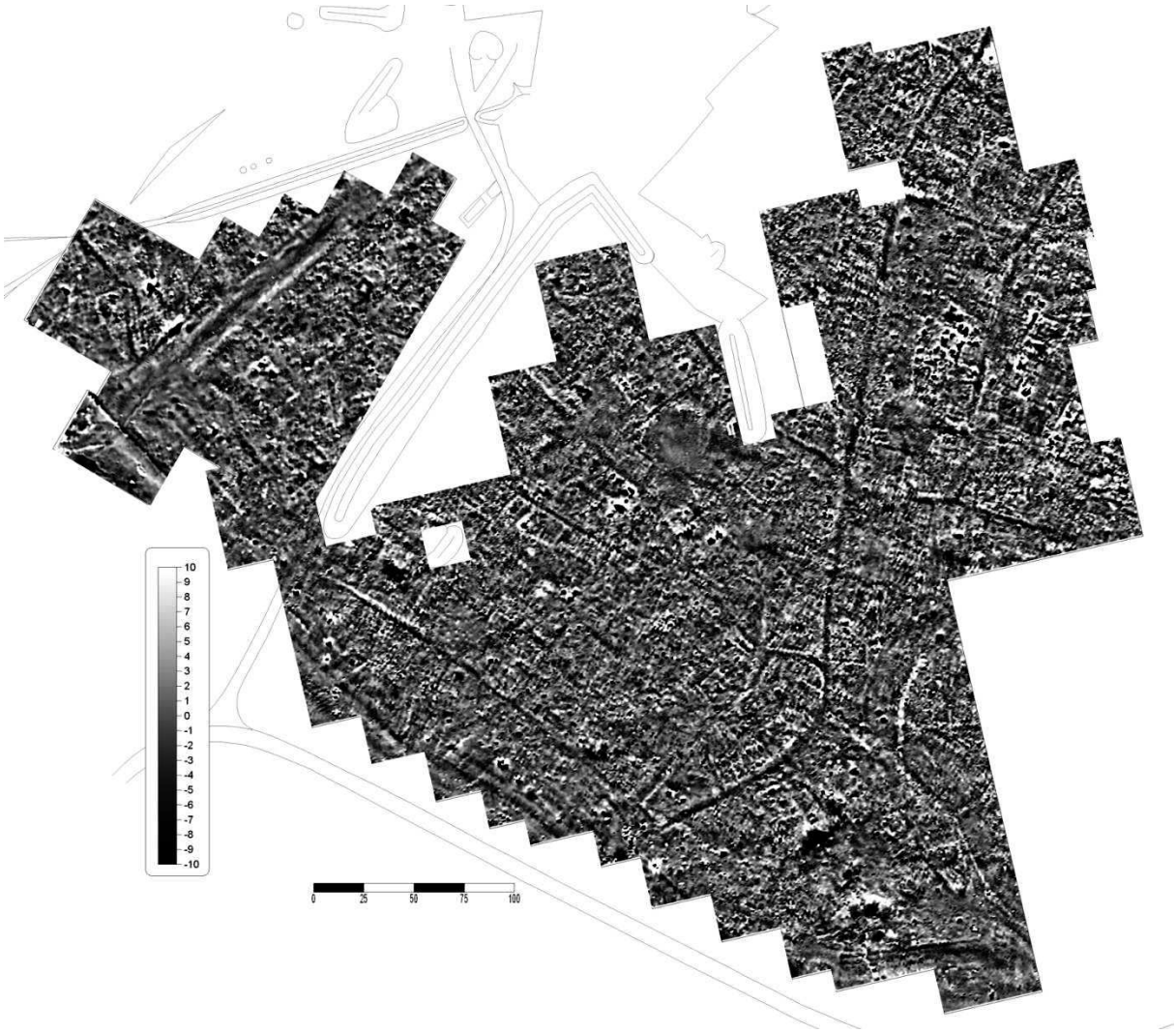


Figure 2.41 ***Carte de gradiométrie verticale de tell Mari.***

7. Conclusion

L'étude archéologique montre qu'à l'exception de tell Al-Rawda, les villes circulaires ont la même organisation générale. Les villes sont constituées d'une ville haute et d'une ville basse avec un rempart entre les deux villes.

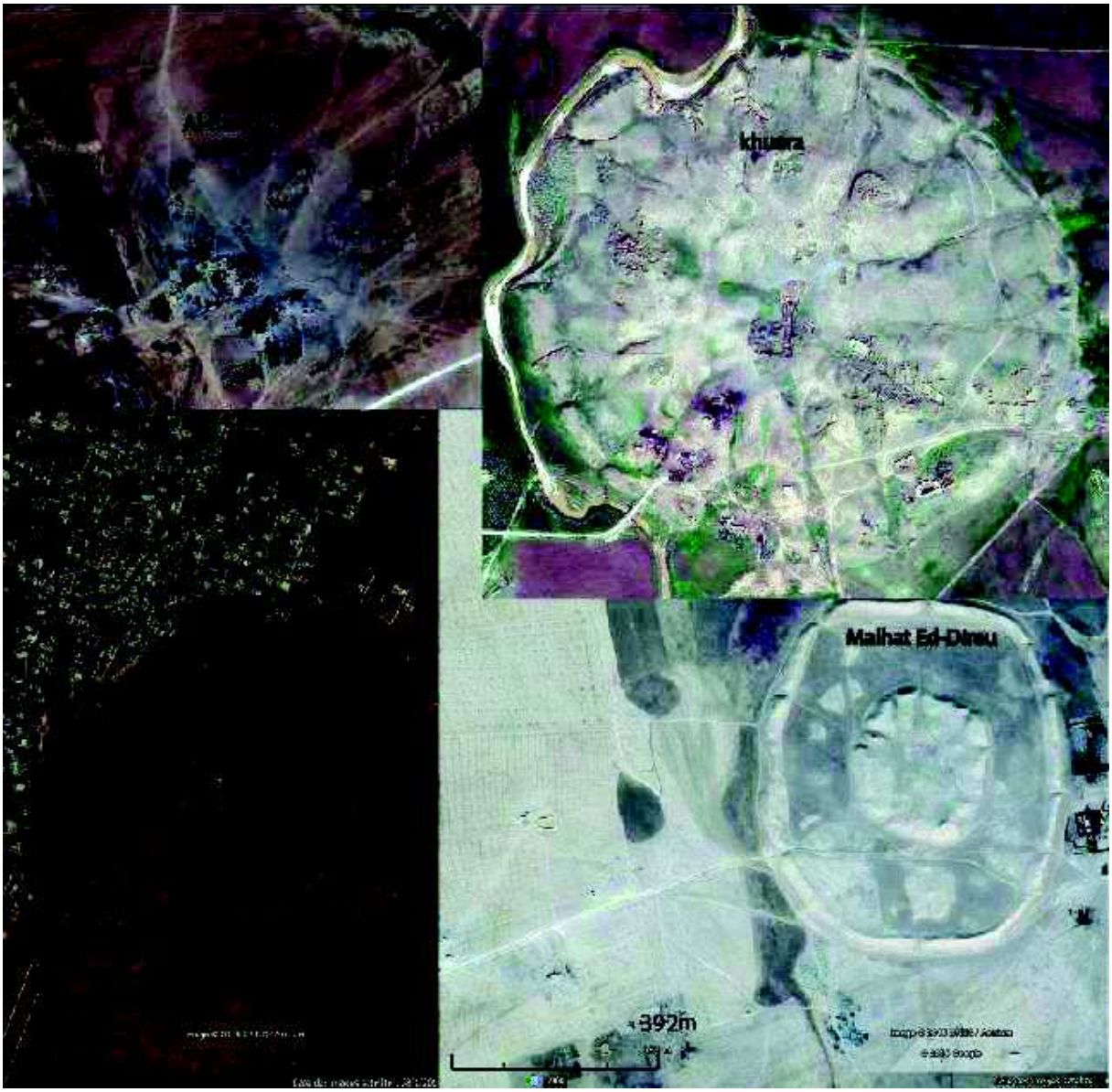


Figure 2.42 ***Images Google Earth pour les sites de Khuera, Malhat Ed-Deru, Al-Rawda et Sh'airat présentées à la même échelle.***

La figure 2: 42 montre la carte des sites concernés par le programme ANR Badiyah (Khuera, Malhat Ed-Deru, Al-Rawda, Sh'airat). On remarque que leur taille est assez différente, Khuera étant le site le plus grand. La carte montre aussi que les sites de Khuera et Al-Rawda sont relativement rond alors que les deux sites de Malhat Ed-Deru et Sh'airat sont plutôt ovale que rond.

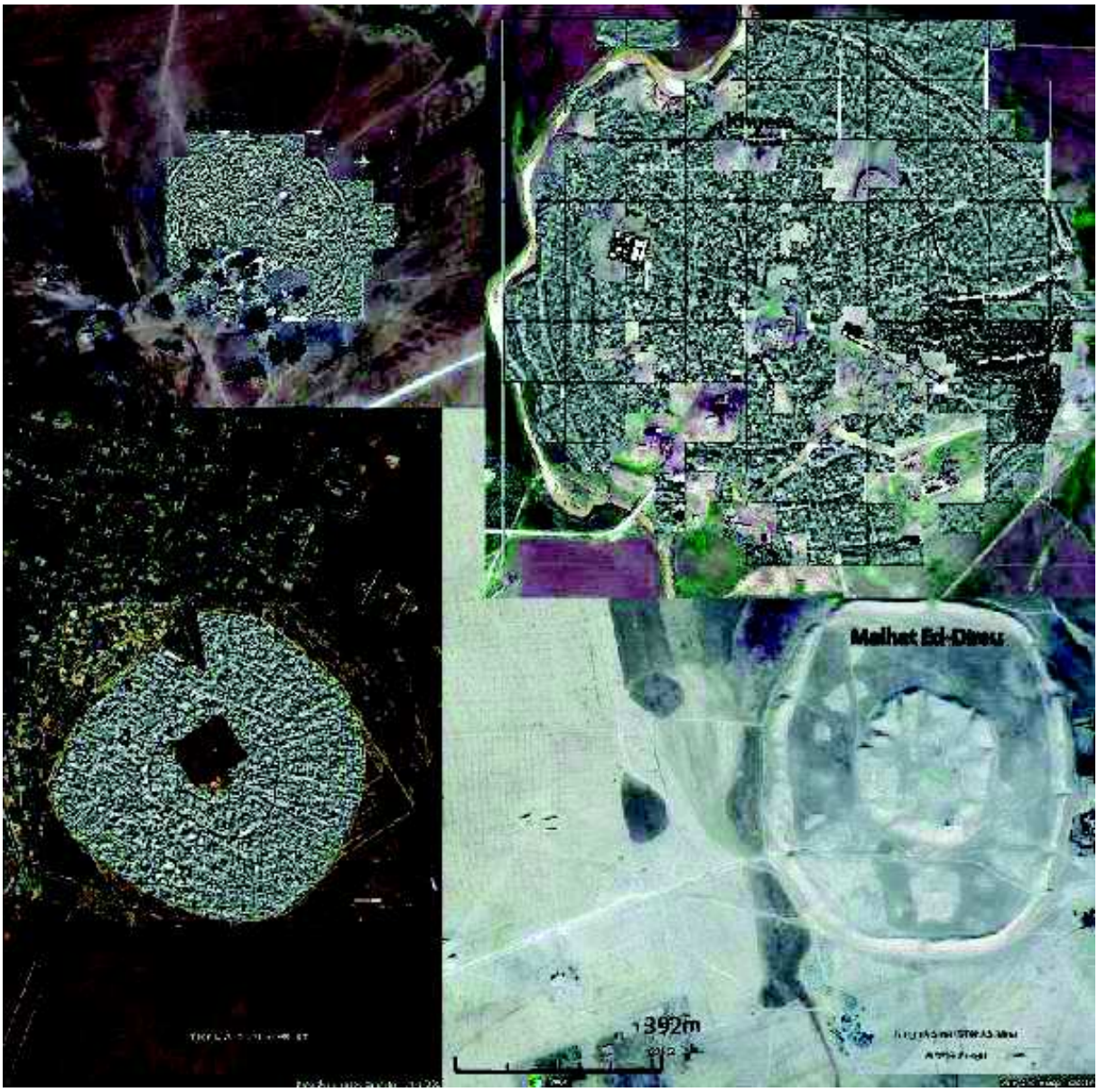


Figure 2.43 ***Cartes de gradiométrie verticale des sites de Khuera, Al-Rawda et Sh'airat.***

Les cartographies magnétiques des sites de Khuera, Al-Rawda et Sh'airat ont donné un plan urbain relativement précis et ont permis de montrer de nombreuses similitudes entre les trois villes circulaires (Figure 43).

Chapitre 3. Les cartographies magnétiques des sites : méthodes et traitement des données

Chapitre 3. Les cartographies magnétiques des sites : méthodes et traitement des données 99

Chapitre 3. Les cartographies magnétiques des sites : méthodes et traitement des données 101

1. Site de Tell Al-Rawda 101

1.1. Mesures magnétiques du laboratoire de Lyon 101

1.1.1. Matériel utilisé 101

1.1.2. Mise en œuvre sur le terrain et traitement des données 102

1.1.3. Traitement des données de Lyon à l'EOST 105

1.1.3.i. Les problèmes de positionnement 105

1.1.3.ii. Problèmes de festonnage et de leveling 107

1.1.3.iii. Traitements des données sur profil 110

1.1.3.iv. Inversion des capteurs bas et haut 112

1.2. Données magnétiques de l'EOST 114

1.2.1. Les systèmes de mesures magnétiques 115

1.2.1.i. La cartographie magnétique à la perche 115

1.2.1.ii. La cartographie magnétique à la luge 117

1.2.1.iii. Les capteurs magnétiques fluxgate trois composantes (Bartington) ... 119

1.2.1.iv. L'étalonnage des capteurs magnétiques 119

1.2.2. Traitement des données 120

1.2.2.i. Calibration des données magnétiques 121

1.2.2.ii. Définition des profils 122

1.2.3. Calcul des cartes magnétiques 124

1.2.3.i. Zone centrale 125

1.2.3.ii. Sud du tell 127

1.2.3.iii. Ouest du tell 129

1.2.3.iv. Cartographie magnétique à la luge 129
1.3. Compilation des données 132
2. Site de Tell Sh'airat 135
2.1. Mesures magnétiques du laboratoire de Lyon 135
2.2. Données magnétiques de l'EOST 137
2.2.1. Traitement les donnés 137
2.2.2. Cartographie magnétique de la zone centrale 138
2.2.3. Cartographie magnétique dans la ville basse 139
2.3. Compilation des données 142
3. Site de Tell Malhat Ed-Deru 144
3.1. La cartographie magnétique 144
3.2. Traitement les donnés 145
3.3. Calcul de la carte magnétique 147
4. Conclusion 152

Chapitre 3. Les cartographies magnétiques des sites : méthodes et traitement des données

Le troisième chapitre présente l'acquisition et le traitement des données magnétiques conduisant à l'obtention de cartes magnétiques. Une partie de mon travail a consisté à traiter et interpréter des données magnétiques acquises par les chercheurs de Lyon, l'autre à faire des mesures magnétiques complémentaires à les traiter et les interpréter. Concernant les données magnétiques de Lyon, seule une carte de gradient verticale a été présentée alors qu'il est possible d'utiliser les données des capteurs magnétiques scalaires et ainsi pousser plus loin les traitements de données et proposer des interprétations plus quantitatives que ce qui a été publié précédemment.

8. Site de Tell Al-Rawda

8.1. Mesures magnétiques du laboratoire de Lyon

Une prospection magnétique a été effectuée du 2 au 21 octobre 2003 à l'aide d'un magnétomètre Geometrics G858 (Figure 3.1). Une deuxième campagne a eu lieu en 2005. La carte de gradient verticale obtenue a permis de mener une étude précise de l'urbanisme radioconcentrique de la ville circulaire d' AI-Rawda (Gondet et Castel, 2004). Certaines zones sur le site et dans sa périphérie n'ont cependant pas été cartographiées et l'étude des aménagements périphériques de la ville est incomplète. Au niveau du site lui-même les zones trop perturbées par les aménagements actuels n'ont pas été cartographiées (Figure 3.2).

8.1.1. Matériel utilisé

Le magnétomètre utilisé pour les deux campagnes est un Geometrics G-858 monté en gradiométrie (Figure 3.1). Il s'agit d'un magnétomètre scalaire à pompage optique (vapeur de Césium) dont la sensibilité est de 0,01 nT à une cadence de mesure de 10 Hz selon la notice du constructeur. Deux sondes sont montées verticalement au bout d'une perche et espacées de 0,8 m. Les mesures gradiométriques correspondent à la différence de mesure réalisée au même moment à chacune des sondes (en nT/m). L'enregistrement des données contient aussi les deux mesures du champ magnétique total à chacune des altitudes. L'avantage de cette façon de mesurer le champ magnétique est que la variation temporelle est éliminée; par ailleurs le signal gradiométrique est plus sensible aux anomalies magnétiques de proche surface. Par contre, selon la profondeur des sources, la différence entre ce gradient et la dérivée verticale du champ magnétique n'est pas négligeable ; d'autre part, l'opérateur ne peut pas tenir la ligne des deux sondes strictement verticalement.

Figure 3.1 ***: A gauche le magnétomètre Geometrics G-858 et à droite un profil magnétique en cours d'acquisition (S. Gondet. © Mission archéologique d'Al-Rawda).***

Le gradiomètre est un dispositif porté. Il consiste en une armature démontable pour fixer les capteurs, des batteries et une console de contrôle et d'enregistrement qui se fixe à la ceinture, La ligne de capteurs est à environ 1 m en avant du porteur. Les mesures sont faites en marchant à vitesse constante.

8.1.2. Mise en œuvre sur le terrain et traitement des données

La méthodologie choisie a consisté à définir sur le terrain des carrés de 50 x 50 m et de parcourir des profils espacés de 1 m à vitesse constante. L'implantation sur le terrain des carrés, l'espacement des profils et le suivi des profils à vitesse constante sont déterminants pour obtenir des cartes magnétiques de qualité. Par ailleurs les opérations de préparation sont longues et il faut définir topographiquement un système de coordonnées. Le système qui a été choisi est local et nous n'avons pas trouvé d'information sur la position absolue des points.

Au total, 82 carrés ont été parcourus, les 55 premiers lors de la campagne de 2003 et les 27 derniers lors de la campagne de 2005 (Figure 3.2 et 3.3). Le plus souvent la direction des profils choisie est nord-sud. La surface prospectée est de 20 ha et représente 219 km parcourus.

Deux carrés 32 et 42 ont été prospectés suivent la direction est-ouest, et les carrés 49 et 55 dans une direction oblique. Certaines zones n'ont pas pu être couvertes car elles étaient en cours de fouille.

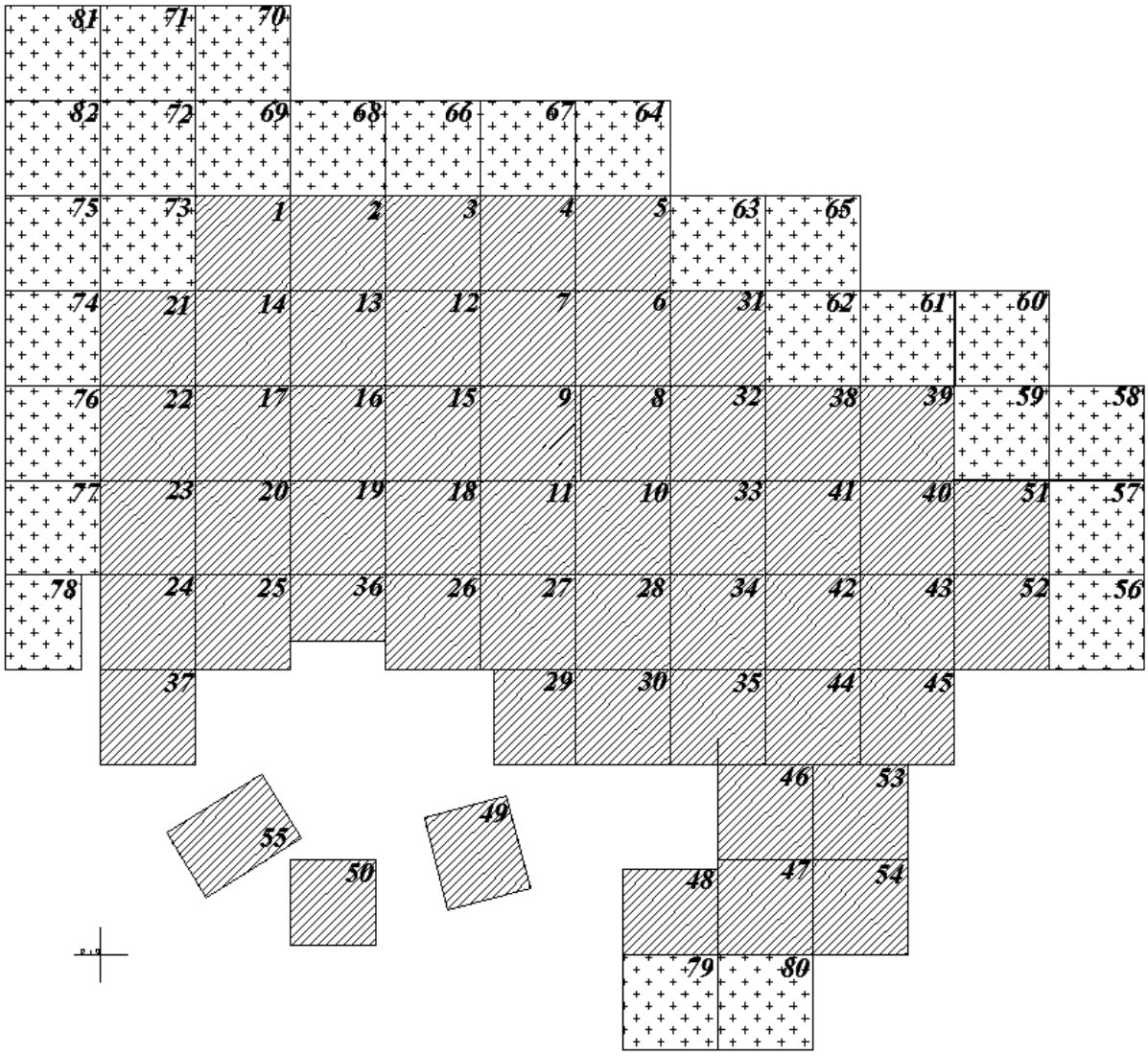


Figure 3.2 ***implantation des 82 carrés de mesure. La croix en bas à gauche donne la position du zéro local du système géographique.***

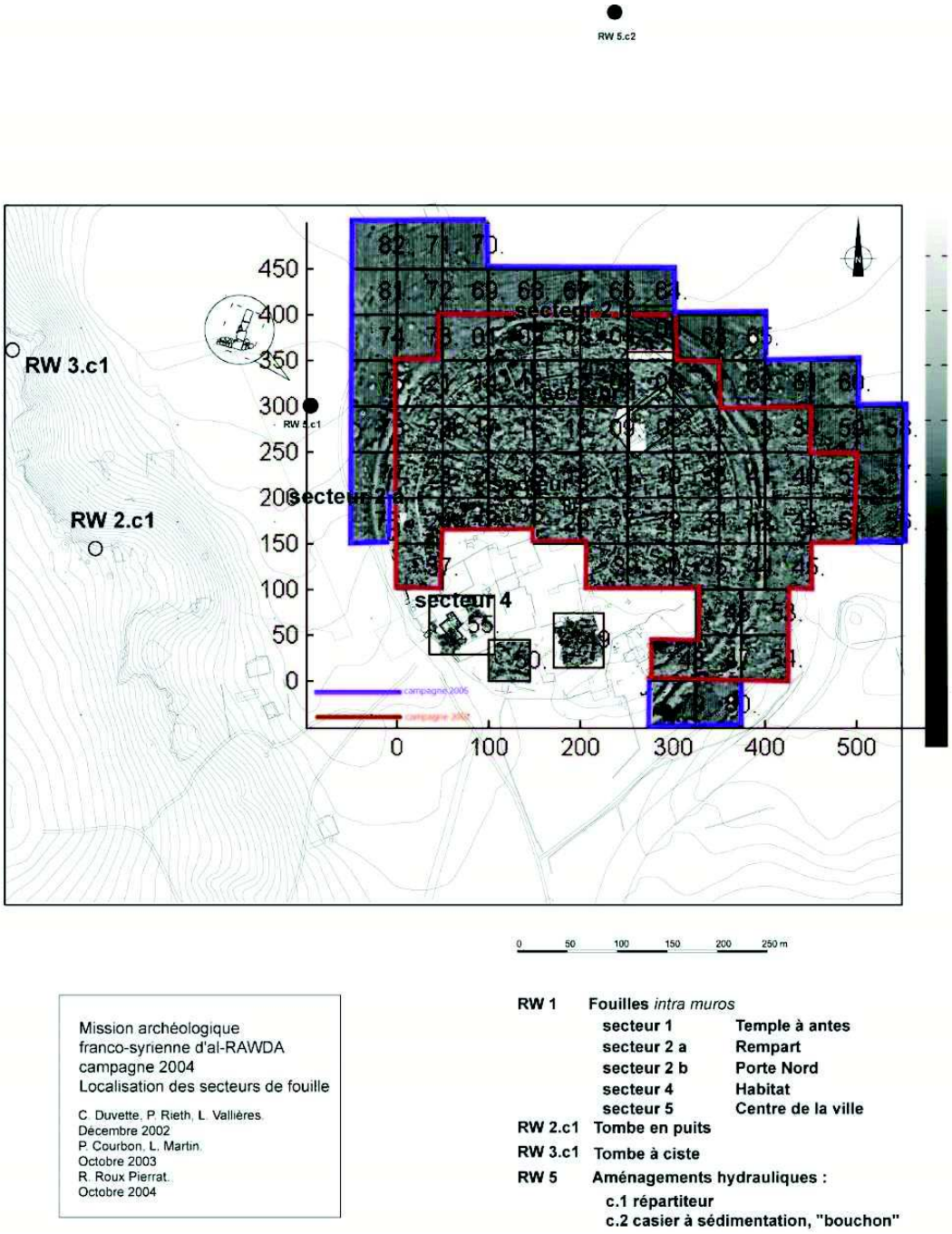


Figure 3.3 ***carroyage des prospections magnétiques de 2003 et 2005 superposé à la localisation des fouilles, la topographie et carte de gradient vertical.***

8.1.3. Traitement des données de Lyon à l'EOST

Les données numériques des deux campagnes de prospection nous ont été remises. À chaque carré correspond un fichier ascii contenant la position en mètres dans un système géographique local, la mesure magnétique du capteur haut (en nT), celle du capteur bas (en nT) et le gradient vertical en nT/m. Malheureusement, les fichiers ne contiennent aucune information sur le temps de la mesure.

8.1.3.i. Les problèmes de positionnement

En utilisant Google Earth avec les repérages effectués par les archéologues et les cartes magnétiques réalisées par l'EOST, on a déterminé un point de rattachement qui permet de donner des coordonnées géographiques (latitude, longitude) à tous les points des fichiers de données. L'essentiel des 82 fichiers de mesure ont pu être ainsi correctement positionnés. Cependant, pour certains fichiers, les informations ne sont pas cohérentes. En effet on dispose aussi d'un fichier image de la gradiométrie au format grd et la figure 3.4 montre que les positons en mètres pour les fichiers 01, 05 et 23 ne sont pas les mêmes. La comparaison a été réalisée pour l'ensemble des cartes et elle est présentée dans les figures 3.5 et 3.6.

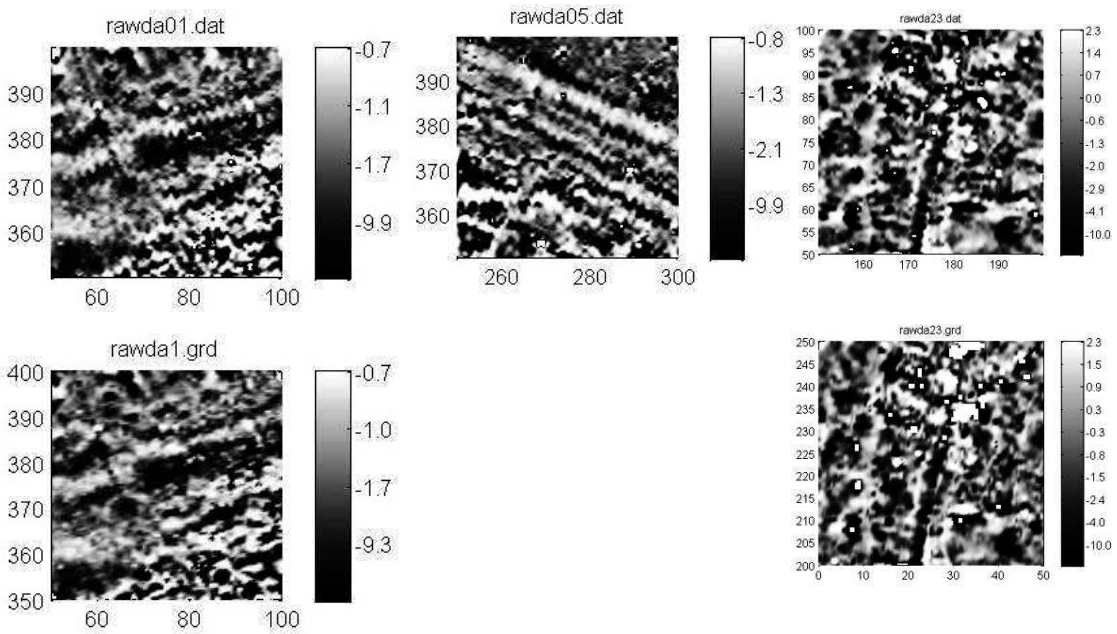


Figure 3.4 ***incohérences des fichiers de données et grd. En haut calcul de la gradiométrie avec les données et en bas image du fichier grd. De gauche à droite, fichiers 01, 05 et 23.***

Les cartes 5 et 7 n'ont pas pu être relocalisées et les fichiers correspondants n'ont pas été conservés pour la synthèse.

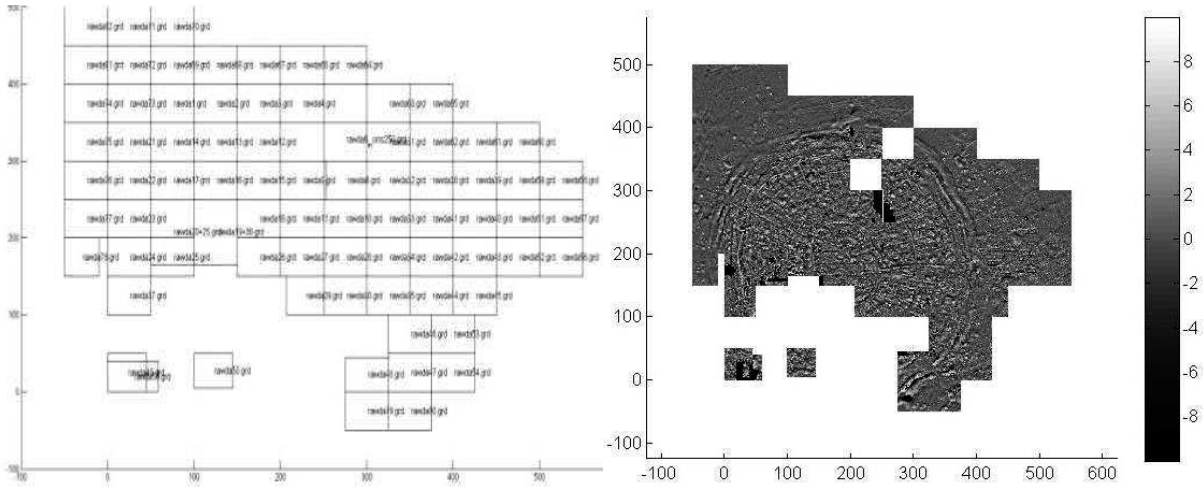


Figure 3.5 ***les carrés des mesures avant la correction de positionnement effectuée par l'Eost à gauche et les cartes de gradiométrie à droite pour les fichiers grd.***

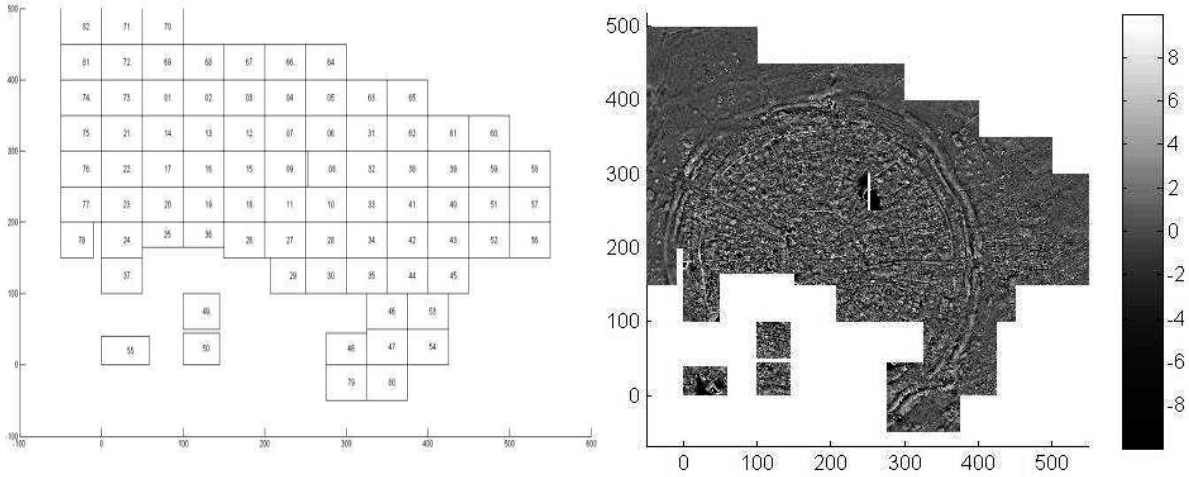


Figure 3.6 ***les carrés des mesures avant la correction de positionnement effectuée par l'Eost à gauche et les cartes de gradiométrie à droite pour les fichiers dat.***

Pour les fichiers 23, 23bis, 49 et 55, on est arrivé par tâtonnement à trouver une position cohérente. Les valeurs retenues sont :

- Carré 23 : -150 m en x et +150 m en y.
- Carré 23bis : correspond au carré 22.
- Carré 49 : +150 m en x et +30 m en y et tourné de 15°.
- Carré 55 : tourné de 30°.

Finalement, on obtient le carroyage et la carte de la figure 3.7 qui seront utilisés pour la synthèse de l'ensemble des données magnétiques du site.

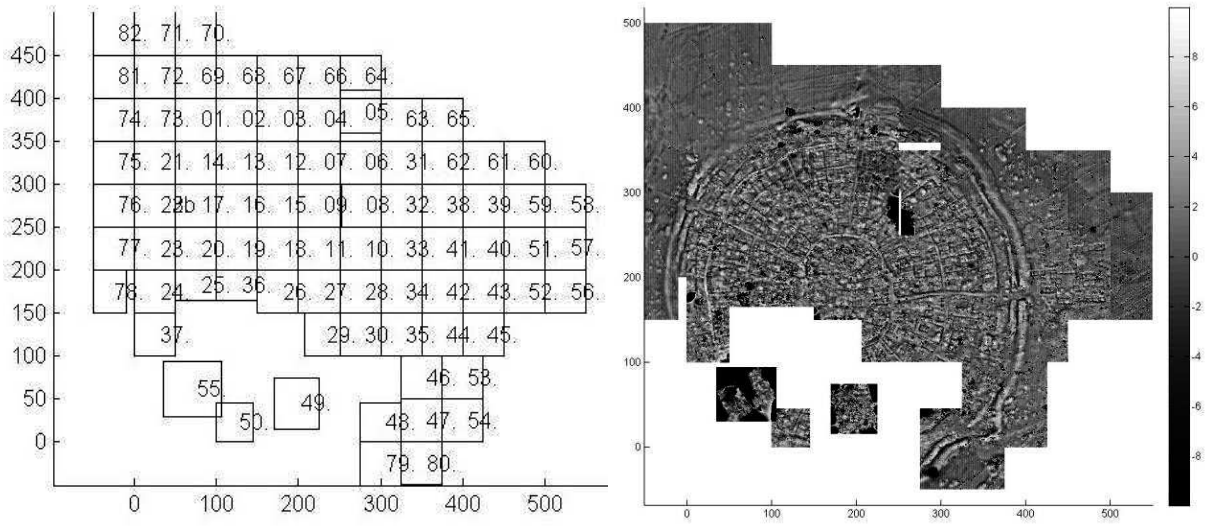


Figure 3.7 ***les carrés des mesures après la correction de positionnement effectuée par l'Eost à gauche, la carte de gradiométrie de S.Gondet après la correction de position des carrés à droite.***

8.1.3.ii. Problèmes de festonnage et de leveling

La visualisation des cartes à partir de chacun des fichiers de données montre trois problèmes

- les valeurs moyennes des cartes de champ magnétique sont décalées d'une constante les unes par rapport aux autres (Figure 3.8);
- selon que les profils soient allé ou retour, on observe un décalage horizontal (festonnage) ;
- selon que les profils soient allé ou retour, on observe un décalage à peu près constant (levelling) des valeurs de champ ou de gradiométrie.

Le décalage de valeurs de champ magnétique entre cartes s'explique très simplement par la non correction de la variation temporelle sur la durée totale de l'acquisition des données. Pour le site d'Al-Rawda, la variation temporelle de l'intensité du camp magnétique régional a été calculée en utilisant l'IGRF et on obtient entre le 1 janvier 2003 et le 31 décembre 2005 une augmentation de 96,5 nT avec une variation journalière moyenne de 0,09 nT. L'absence d'information sur l'heure des mesures ne permet pas de corriger de cette variation.

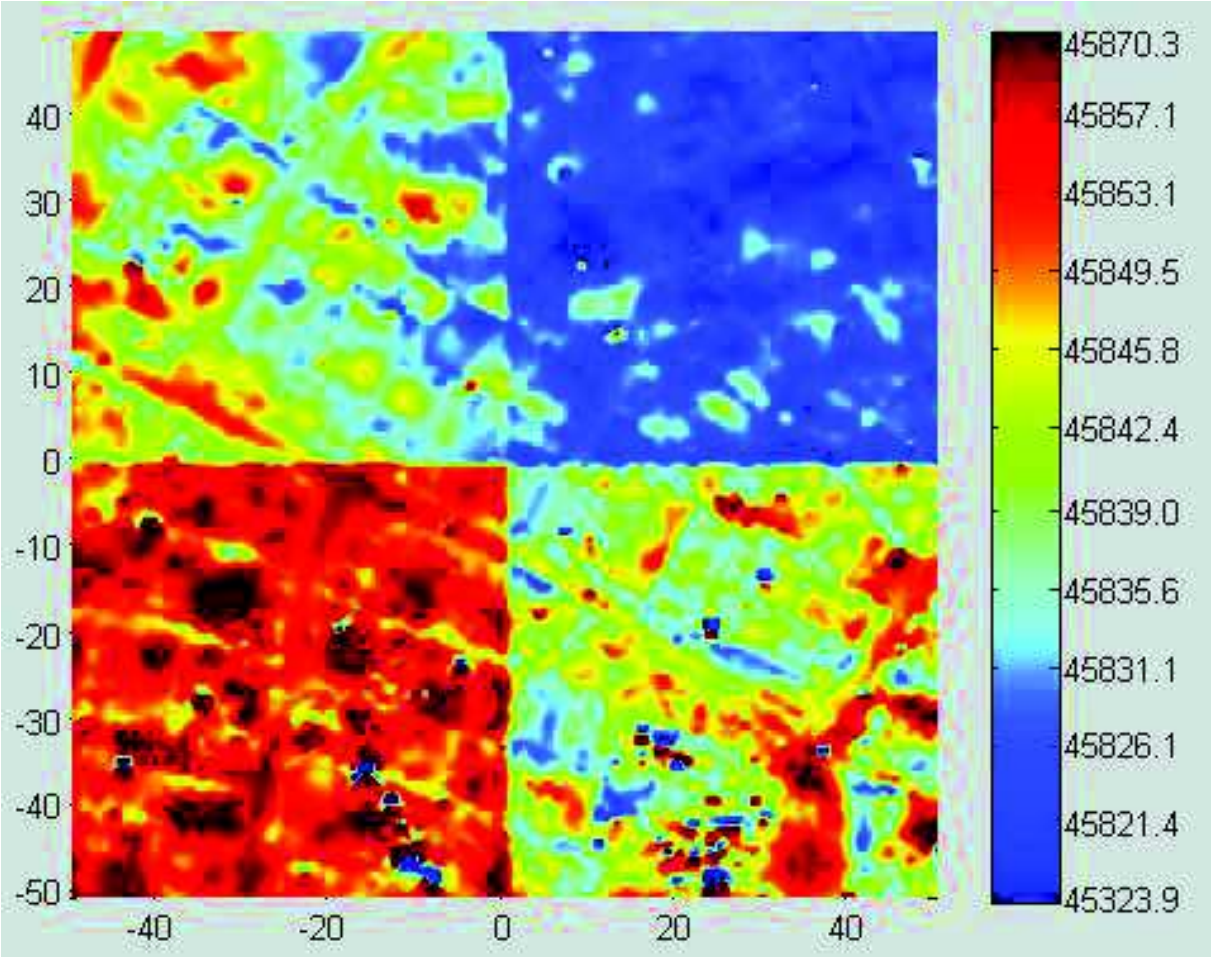


Figure 3.8 ***exemple de l'assemblage de données magnétiques du capteur haut de quatre cartes montrant des décalages entre cartes et au sein des cartes.***

Le problème de festonnage résulte d'une mauvaise définition de la position longitudinale de la sonde le long des profils d'une carte. Nous n'avons trouvé aucune explication à l'origine de ce défaut. Il a fallu vérifier pour chacune des cartes s'il fallait appliquer une correction longitudinale aux données des profils. En général, on a retenu une valeur de 0,3 m pour les données de 2003 et une valeur de 0,5 pour les données de 2005. Cependant, pour certains carrés, d'autres valeurs ont dû être retenues. La figure 3:9 montre comment le travail a été fait pour le carré 5. On calcule la carte de gradiométrie pour différentes valeurs de décalage, 0,2 à 0,9 m et les images montrent que la bonne valeur de décalage est égale à 0,3 m. Pour les mesures de 2005, on montre l'exemple du carré 66, pour lequel le meilleur décalage horizontal est de 0,5 m (Figure 3.10).

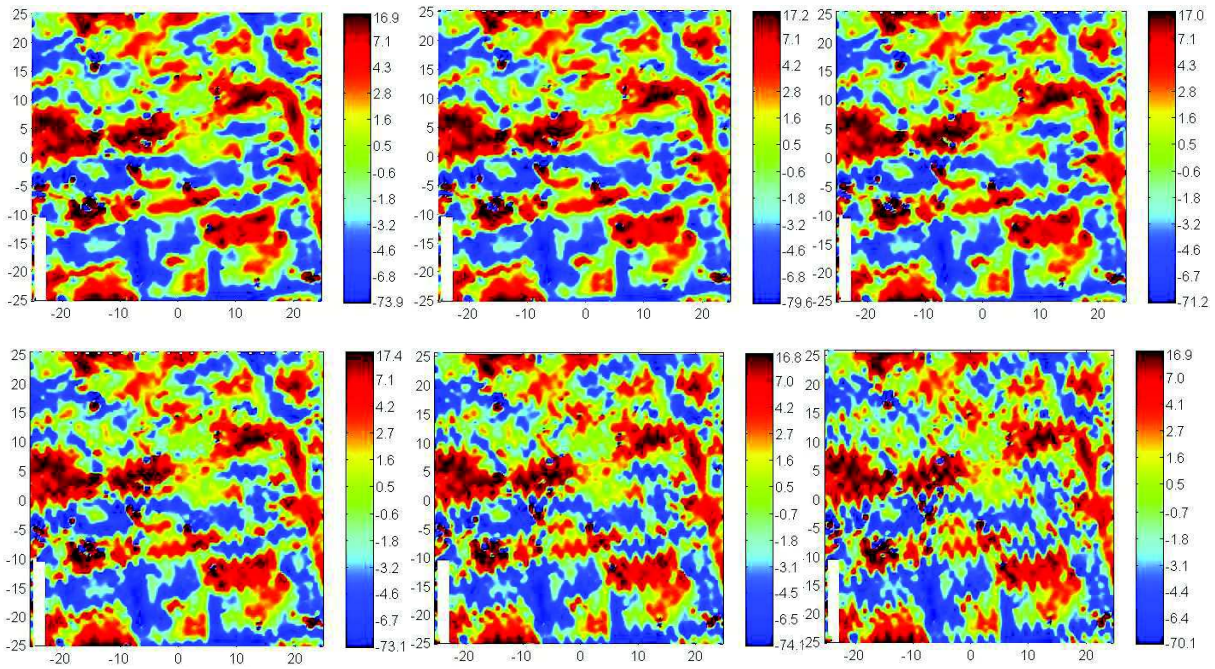


Figure 3.9 ***étude du festonnage sur le carré 5 (2003). Les données de gradiométrie sont décalées de 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,7 et 0,9 m le long des profils de gauche à droite et de haut en bas. Pour cet exemple, une valeur de décalage de 0,3 m a été retenue.***

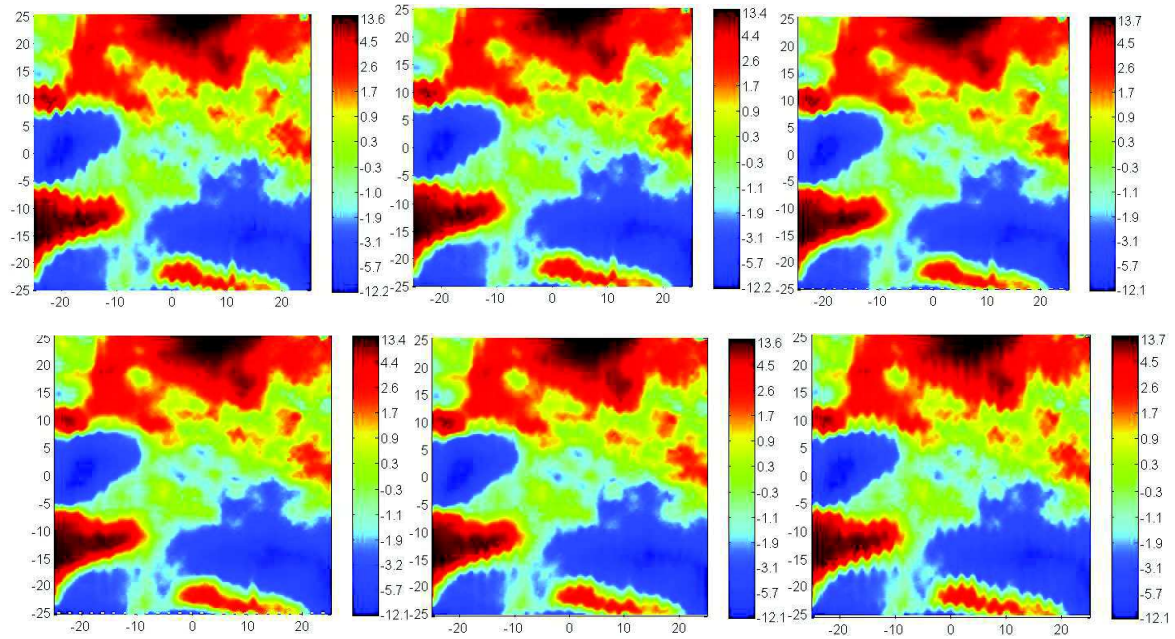


Figure 3.10 ***étude du festonnage sur le carré 66. Les données de gradiométrie sont décalées de 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,7 et 0,9 m le long des profils de gauche à droite et de haut en bas. Pour cet exemple, une valeur de décalage de 0,5 m a été retenue.***

Concernant les décalages d'une valeur constante du champ magnétique selon les profils, encore appelé levelling, ils s'expliquent très vraisemblablement par le fait que l'équipement et l'opérateur ne sont pas complètement amagnétiques. Ce problème aurait pu être

quantifié si l'opérateur avait fait un tour complet autour de la ligne des capteurs maintenue en un point fixe et à une altitude constante. Une expérience de ce type réalisée en France avec un magnétomètre GEM GSM 19 (magnétomètre à effet overhauser) donne une variation totale de 20 nT pour une rotation complète avec un opérateur amagnétique. Il faut noter que, dans ce cas, un système de positionnement GPS était ajouté par le constructeur à l'équipement de mesure magnétique. Il n'existe pas, vu les données enregistrées de méthode pour corriger objectivement ce défaut. La méthode que nous utilisons consiste à enlever aux mesures de chaque profil leur médiane.

8.1.3.iii. Traitements des données sur profil

Pour chacun des carrés, chacun des profils a été édité. Cette édition montre quelques cas de valeurs aberrantes. Par exemple, pour le carré 33, la partie droite de la carte de champ magnétique montre de nombreuses valeurs erratiques pour le capteur bas, alors que la carte du capteur haut est de bonne qualité (Figure 3.11). La correction consiste à éliminer manuellement les valeurs jugées aberrantes (Figure 3.12).

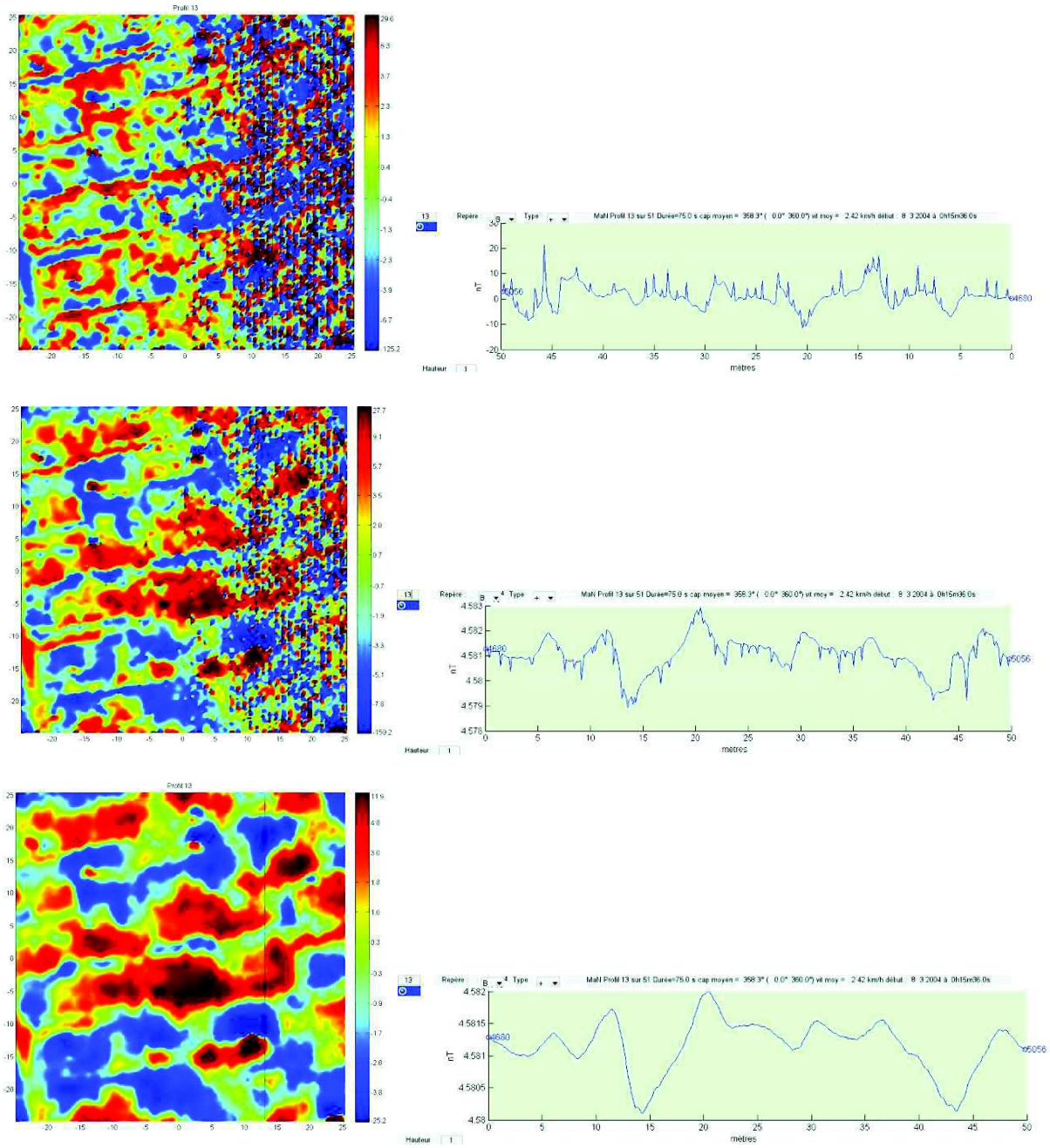


Figure 3.11 ***carré 33, en haut, carte magnétique du gradient vertical et profil 13 nord-sud ; au milieu, carte magnétique du capteur bas et profil 13 ; en bas, carte magnétique du capteur haut et profil 13.***

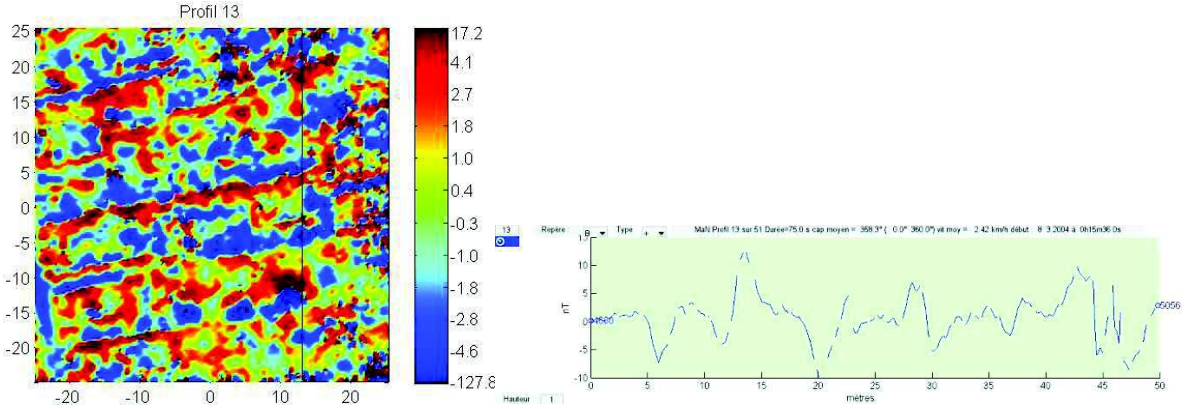


Figure 3.12 ***Carré 33, après élimination des valeurs aberrantes, carte de gradient vertical à gauche et données du capteur bas du profil 13.***

8.1.3.iv. Inversion des capteurs bas et haut

Pour certains des carrés on a trouvé que dans les fichiers de données, les capteurs haut et bas sont inversés. Par exemple pour le carré 33, la figure 3:13 montre cette inversion. Pour 34 carrés sur 82, il a fallu appliquer cette correction.

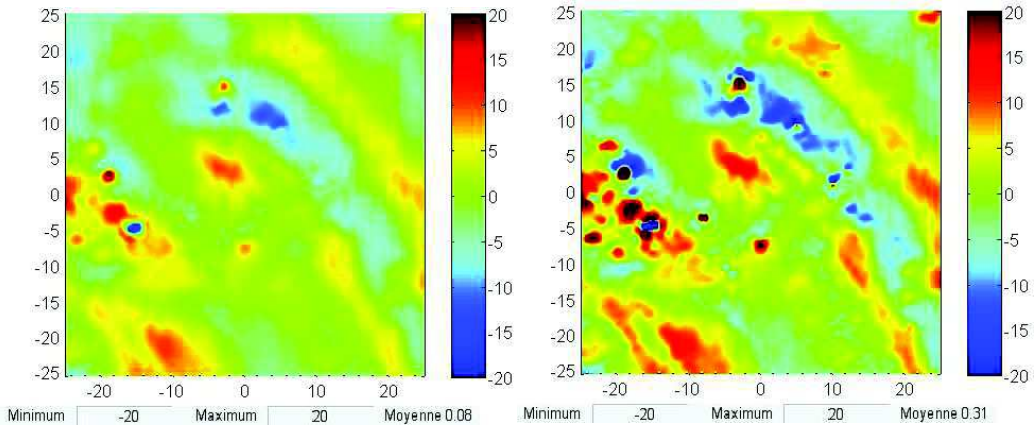


Figure 3.13 ***Carré 31, à partir du fichier de données, capteur bas à gauche et capteur haut à droit. Les deux capteurs doivent être inversés.***

Finalement, après la réalisation de tous ces traitements on obtient des cartes magnétiques d'ensemble pour lesquelles nous pensons avoir corrigé les défauts rencontrés. Le dernier problème restant à résoudre est de trouver la transformation du repère géographique local à un repère absolu (longitude, latitude, altitude). Cette opération a été faite par tâtonnement en superposant les cartes à celles de l'EOST qui sont géoréférencées. Pour l'origine du repère local, on attribue une longitude de 37.6305436°E et une latitude de 35.1795760°N. Pour l'altitude, on a considéré que toutes les mesures ont été prises à une altitude constante de 500 m.

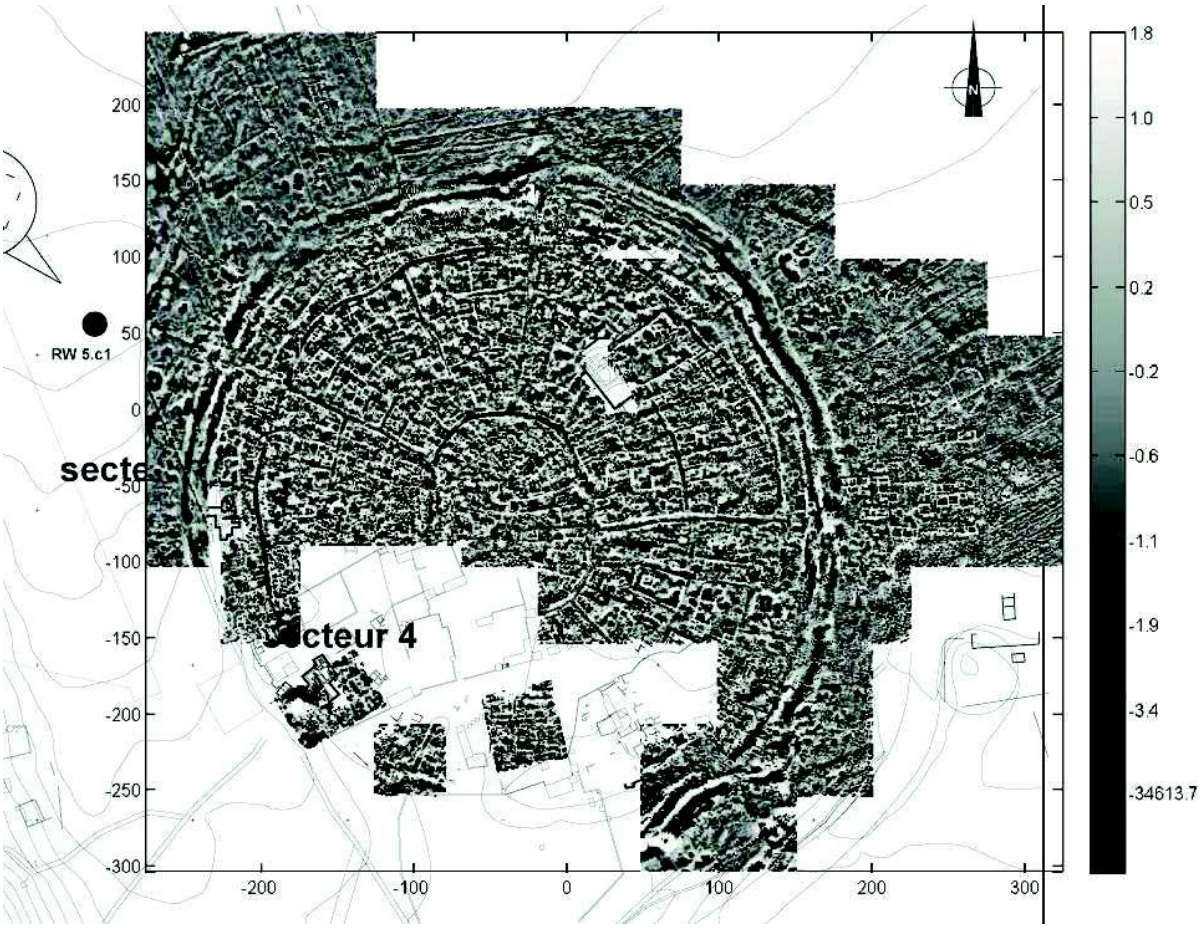


Figure 3.14 ***La carte de gradiométrie d'Al-rawda avec les données du laboratoire de Lyon après traitements effectués à l'EOST.***

Si on compare la carte d'Al-Rawda avant et après la correction effectuée par notre laboratoire on voit bien que la carte après la correction est plus précise. Par exemple sur la carte (figure 3.15) le fossé apparait beaucoup mieux sur la carte de l'Eost et on voit mieux la porte Est de la ville sur notre carte. On remarque également que les festonnages dans la rue R1 sur la carte de Gondet ont disparu sur notre carte. Les structures carrées à l'extérieur de la ville apparaissent mieux aussi sur la carte corrigée.

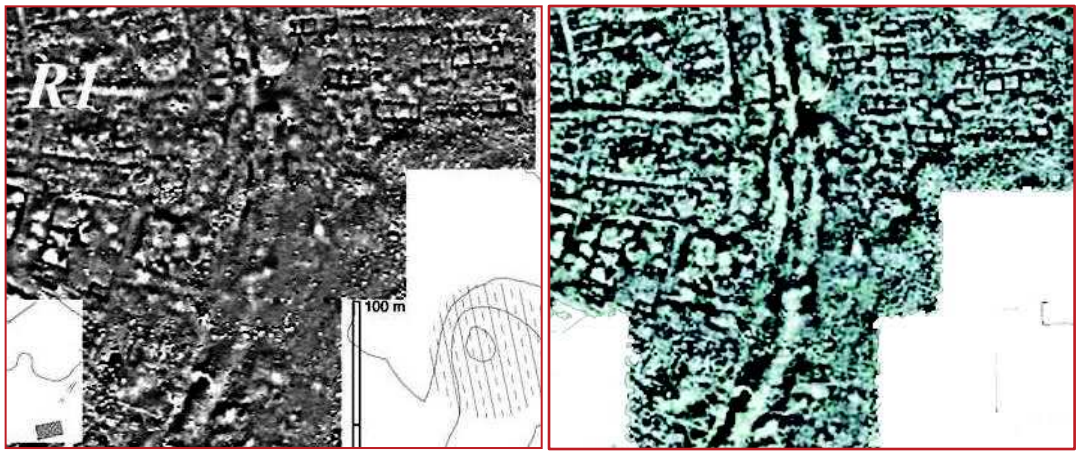


Figure 3.15 ***La carte de gradiométrie d'Al-Rawda avec les données du laboratoire de Lyon, montre le fossé au sud-est de la ville Al-Rawda avant les traitements effectués à l'EOST à gauche, après les traitements effectués à l'EOST à droite.***

La figure 3.16 montre un autre exemple sur l'amélioration de la carte, où on voit que les festonnages et beaucoup des défaut sont disparue sur notre carte.

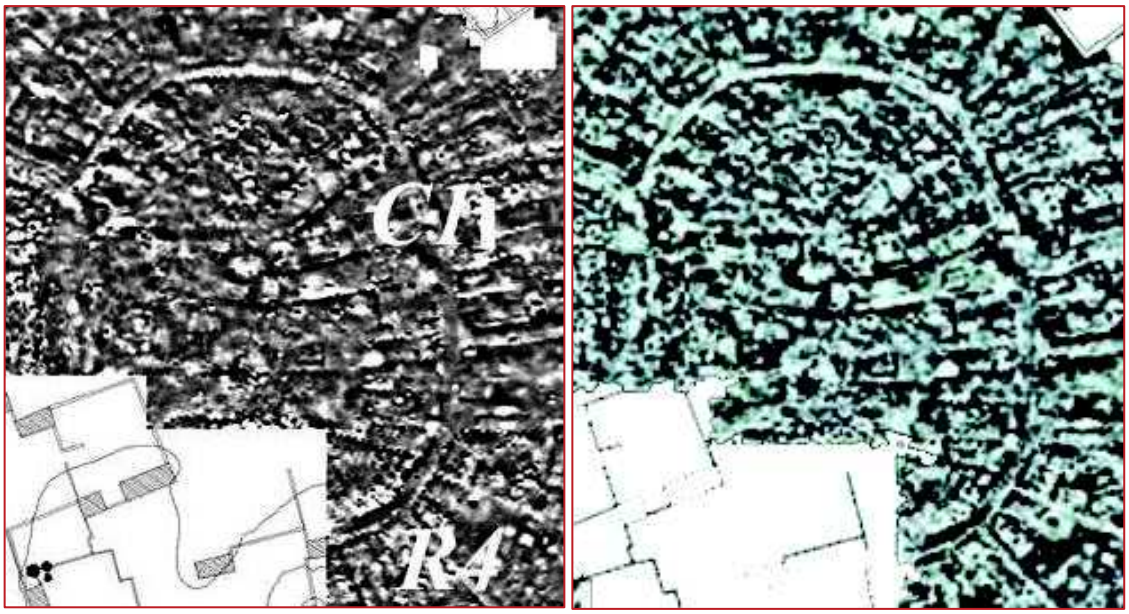


Figure 3.16 ***La carte de gradiométrie d'Al-Rawda avec les données du laboratoire de Lyon, montre la zone centrale de la ville Al-Rawda avant les traitements effectués à l'EOST à gauche, après les traitements effectués à l'EOST à droite.***

8.2. Données magnétiques de l'EOST

Du 18 septembre au 5 octobre 2010, 16 jours de cartographie magnétique ont été réalisés sur le site d'Al-Rawda et à l'extérieur au sud et à l'ouest. L'objectif était de

compléter la cartographie magnétique déjà réalisée par le laboratoire de Lyon et de réaliser des cartographies plus détaillées et plus précises.

8.2.1. Les systèmes de mesures magnétiques

En utilisant des capteurs magnétiques fluxgate, l'équipe a mis au point un système complet d'acquisition sur le terrain et en aérien. Ce système a été mis en œuvre à deux niveaux de résolution sur le site d'Al-Rawda, perche et luge. On décrit ici les différentes manières d'acquérir les données et les particularités de chacune des méthodes.

8.2.1.i. La cartographie magnétique à la perche

Le système de mesure à la perche mis en œuvre est constitué de la façon suivante :

Quatre magnétomètres « fluxgate » type Bartington (mesure simultanée du champ magnétique à 25 et 75 cm de part et d'autre de la route suivie par l'opérateur); leur hauteur par rapport au sol est de 1 m; précision environ 1 nT; cadence 30 mesures par seconde. Les capteurs sont espacés horizontalement de 0,5 m et fixés dans un tube en plastique d'une longueur de 1,5 m.

Le tube en plastique est fixé à une barre en aluminium de 0,9 m de longueur attachée à un sac à dos rigide non magnétique (Figure 3.17). Le sac à dos contient le boitier électronique, une batterie d'alimentation et une antenne GPS type Trimble 5800 fixée au sommet du sac à dos. Ce système permet à l'opérateur de suivre un profil tous les 2 m tout en faisant une acquisition magnétique avec un profil tous les 0,5 m.

Récepteur GPS Trimble 5800 utilisé pour le positionnement des mesures magnétiques; précision d'environ 10 cm lorsque le ciel est dégagé. La cadence est de 1 mesure par seconde. En présence de bâtiments et/ou si le ciel est partiellement masqué par de la végétation, la précision peut être très fortement dégradée; on peut même avoir une perte complète du signal GPS. Dans ces cas, l'opérateur se doit de marcher à vitesse constante pour aider au repositionnement des mesures magnétiques (par une interpolation linéaire).

Un PC ultra portable est installé sur l'électronique et relié avec elle par une connexion internet. Le PC acquière en temps réel les données magnétiques et GPS et les affiche à l'écran à partir d'une application développée par le laboratoire sous Matlab. L'essentiel de l'écran est occupé par une fenêtre de navigation qui contient la route théorique à suivre et les points de navigation au fur et à mesure qu'ils sont délivrés par l'acquisition temps réel. La partie haute de la fenêtre affiche les données magnétiques en fonction du temps. Une lunette HMD (head mounted display) est connectée au PC et permet de visualiser les

données durant la marche (Figure 3.18). Par ailleurs, l'opérateur dispose d'une souris / clavier à main qui permet d'interagir avec le PC durant les opérations sans retirer le sac à dos. Ces dispositifs permettent à un seul opérateur de réaliser la cartographie. En effet, il n'est plus nécessaire d'installer sur le sol des marques (décamètres, piquets) ni que des personnes vérifient que l'opérateur suive bien la route théorique.

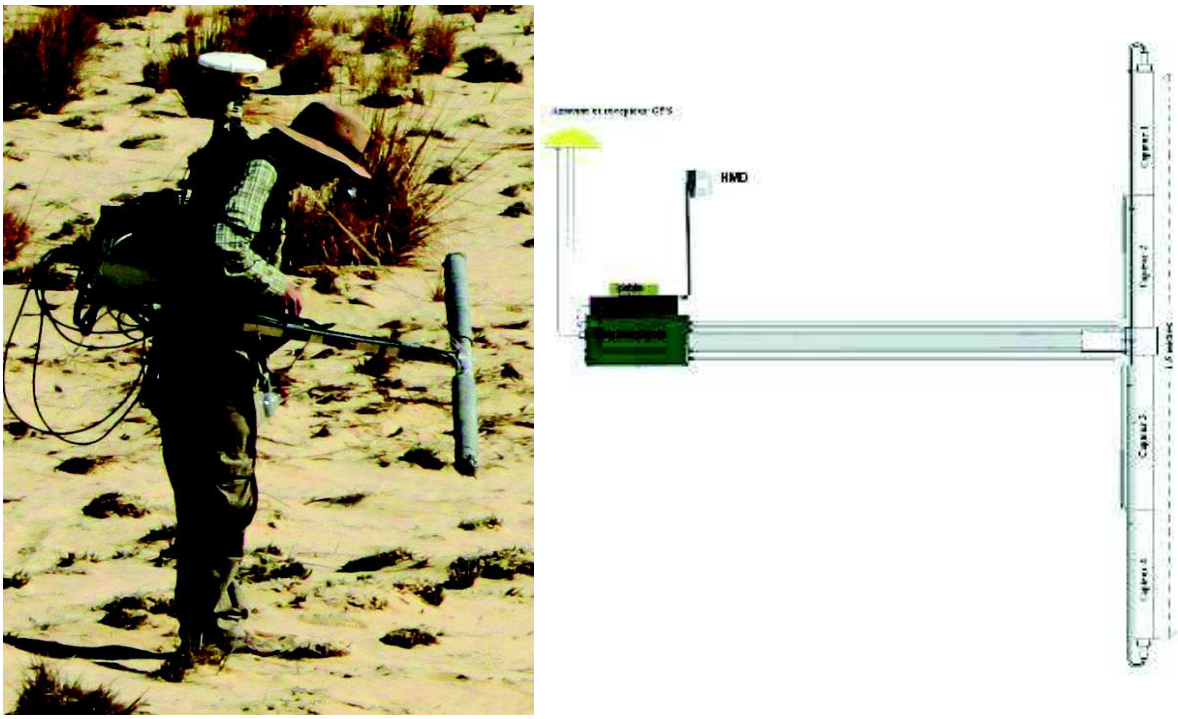


Figure 3.17 ***Système de perche version quatre capteurs type fluxgate.***

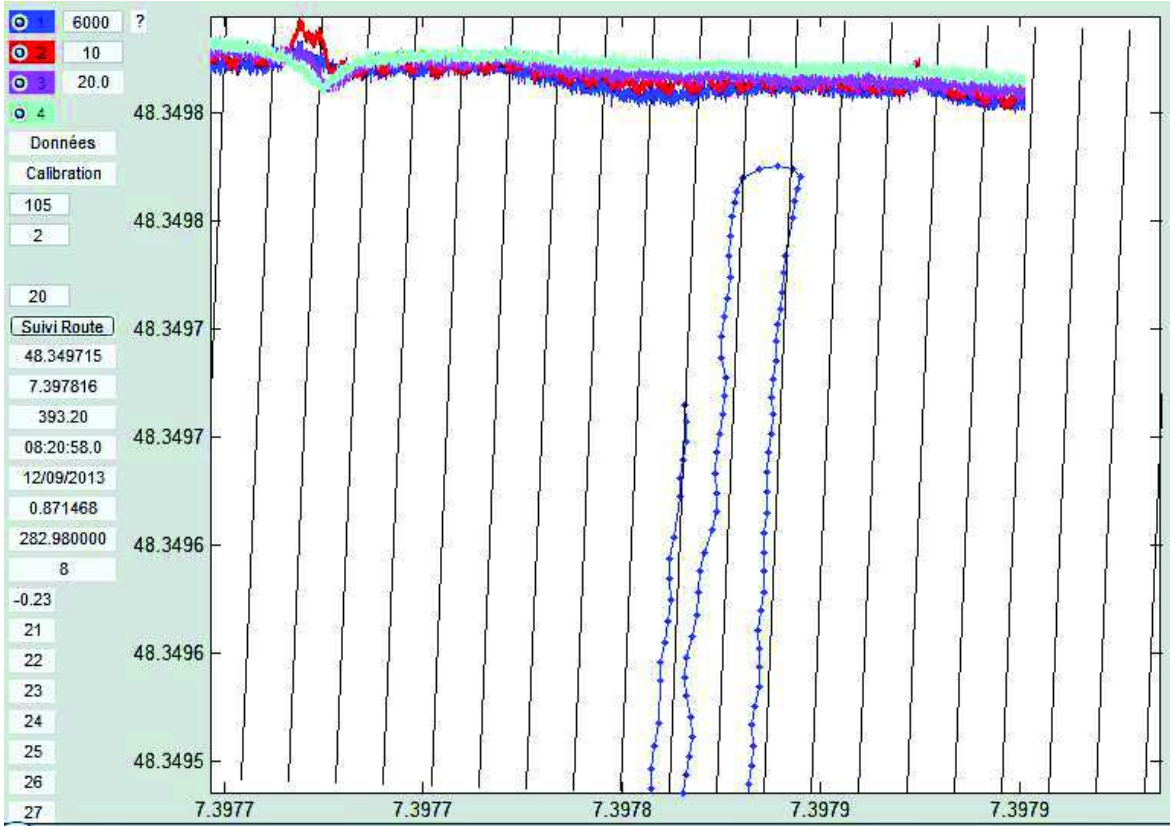


Figure 3.18 ***visualisation temps réel de la route à suivre par l'opérateur (traits noirs), de la navigation réellement suivie (traits bleus) et données de champ magnétique (en haut de la figure).***

8.2.1.ii. La cartographie magnétique à la luge

La luge dont la mise en œuvre est plus longue est assez similaire au dispositif à la perche. Les capteurs sont fixés à l'avant d'une luge à 10 cm les uns des autres. L'électronique ainsi que le GPS sont fixés le plus loin possible à l'arrière. Dans ce dispositif les capteurs sont trainés à 10 cm du sol. Le fait que les capteurs soient traînés très proches du sol permet d'augmenter la résolution (Figure 3.19).

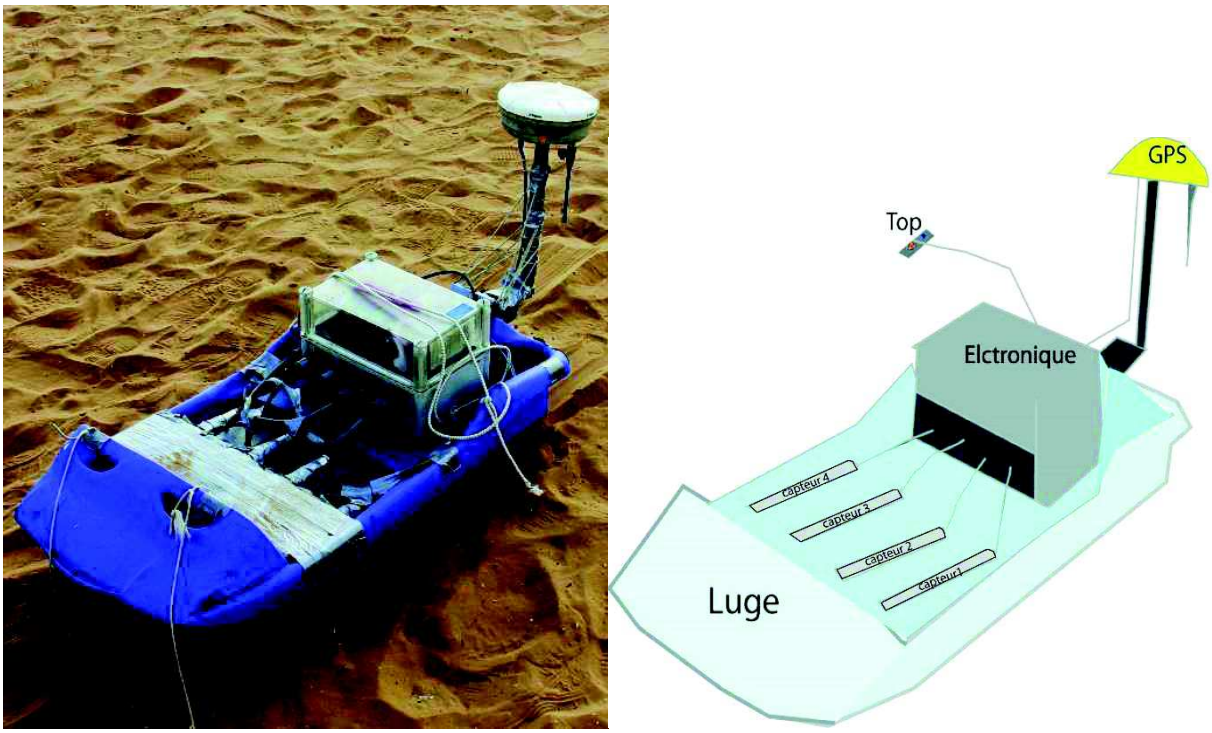


Figure 3.19 ***Système multicapteur de mesure au sol version quatre capteurs type fluxgate à la luge : les capteurs sont espacés de 10 cm entre eux.***

La cartographie réalisée avec la luge consiste donc à réaliser des profils parallèles entre eux, mais espacés de 0.5 m, puis quelques traverses.

8.2.1.iii. Les capteurs magnétiques fluxgate trois composantes (Bartington)

On utilise toujours des capteurs fluxgate de type triaxial MAG-03MC de marque Bartington Instruments (Figure 3.20). Ils sont associés à un système de numérisation 20 bits sigma-delta développé par notre laboratoire. La cadence maximale du numériseur est de 300 échantillons par seconde et la cadence choisie pour les mesures est de 30 mesures par seconde, ce qui est suffisant au vu de la vitesse de marche de l'opérateur (à 5 km/h la distance entre les points de mesure est de 4,5 cm).

Vu la taille et la légèreté du capteur, on peut facilement mettre en œuvre la mesure multicapteurs, l'électronique actuelle étant conçue pour 8 capteurs.

Les caractéristiques principales de ce type de magnétomètre sont décrites ci-dessous.

Bartington 3-axis Fluxgate MAG-03MC	
Alimentation	12 V
Bande passante	1 kHz
Bruit interne	6 to ≤10 pTrms/√Hz at 1 Hz
Erreur d'orthogonalité	<0.5°
Erreur d'Offset	±5 à ±50 nT selon l'amplitude de mesure
Dimension	25×202 mm
Masse	85 g

Figure 3.20 ***le magnétomètre fluxgate Bartington MAG-03MC et ses caractéristiques.***

8.2.1.iv. L'étalonnage des capteurs magnétiques

L'étalonnage des capteurs magnétiques s'effectue avant et après chaque cartographie qui dure environ une heure. Il consiste à changer le plus possible l'attitude des capteurs magnétiques au-dessus d'un point fixe. L'opérateur, sac au dos, tourne autour d'un point fixe durant une minute environ tout en basculant les capteurs de 40° par rapport à l'horizontale. Les capteurs fluxgate comportent 3 axes orthogonaux qui mesurent chacun une des trois composantes du vecteur champ magnétique. Il existe des erreurs inhérentes à

ces capteurs et la méthode d'étalonnage a pour finalité de corriger ces erreurs. Elles sont au nombre de neuf (Munschy et al. 2007)

• les erreurs de « zéro » : si le champ magnétique est nul, la valeur mesurée par la composante n'est pas forcément nulle,

• les coefficients de sensibilité des composantes sont fixés par le constructeur, de façon assez précise, mais pas suffisamment,

• les trois composantes ne sont pas montées strictement orthogonalement.

Ces erreurs sont liées à la fabrication des capteurs et aux conditions dans lesquelles ils évoluent, en particulier la température.

L'algorithme d'étalonnage et le programme correspondant développés sous matlab permettent de calculer les neuf erreurs par problème inverse. L'avantage de la méthode est que l'étalonnage permet aussi de calculer la compensation des aimantations liées aux capteurs (Munschy et al., 2007). Ainsi, le problème de levelling des données magnétiques de l'université de Lyon n'existe pas ou quasiment pas dans notre cas. Durant toute la mission à Al-Rawda, un seul point d'étalonnage a été choisi (croix rouge de la figure 3.24).

8.2.2. Traitement des données

Les mesures magnétiques et GPS sont stockées dans une mémoire flash SD. L'opérateur dispose d'un petit boîtier à deux boutons : l'un permet de débuter et interrompre les mesures (début et fin de fichier); l'autre de marquer un enregistrement particulier lorsque le bouton est actionné, ce qui permet d'indiquer en particulier les débuts et fins de profils.

Après chaque cartographie, les données de la mémoire flash sont transférées sur un PC et sauvegardées. Le traitement des données est réalisé par un programme informatique mis au point et maintenu par l'EOST. Ce programme a pour objet, de contrôler les données et de calculer une grille d'anomalie magnétique. Plus particulièrement, les opérations suivantes sont généralement faites

- lecture et contrôle des données magnétiques,
- lecture et contrôle des données de navigation et de leur calage relatif aux angles de la cartographie,
- calcul de la localisation des données magnétiques à l'aide de ces références,
- vérification des débuts et fin de profils,
- vérification des données magnétiques par édition des profils,
- calcul de l'anomalie magnétique sur profils,
- calcul de la grille d'anomalie magnétique.

8.2.2.i. Calibration des données magnétiques

Le logiciel de calibration est utilisé pour étalonner des données des capteurs magnétiques à trois composantes et compenser des aimantations liées au système de mesure (Figure 3.21). Les paramètres d'étalonnage sont stockés dans un fichier qui sera utilisé pour faire les corrections.

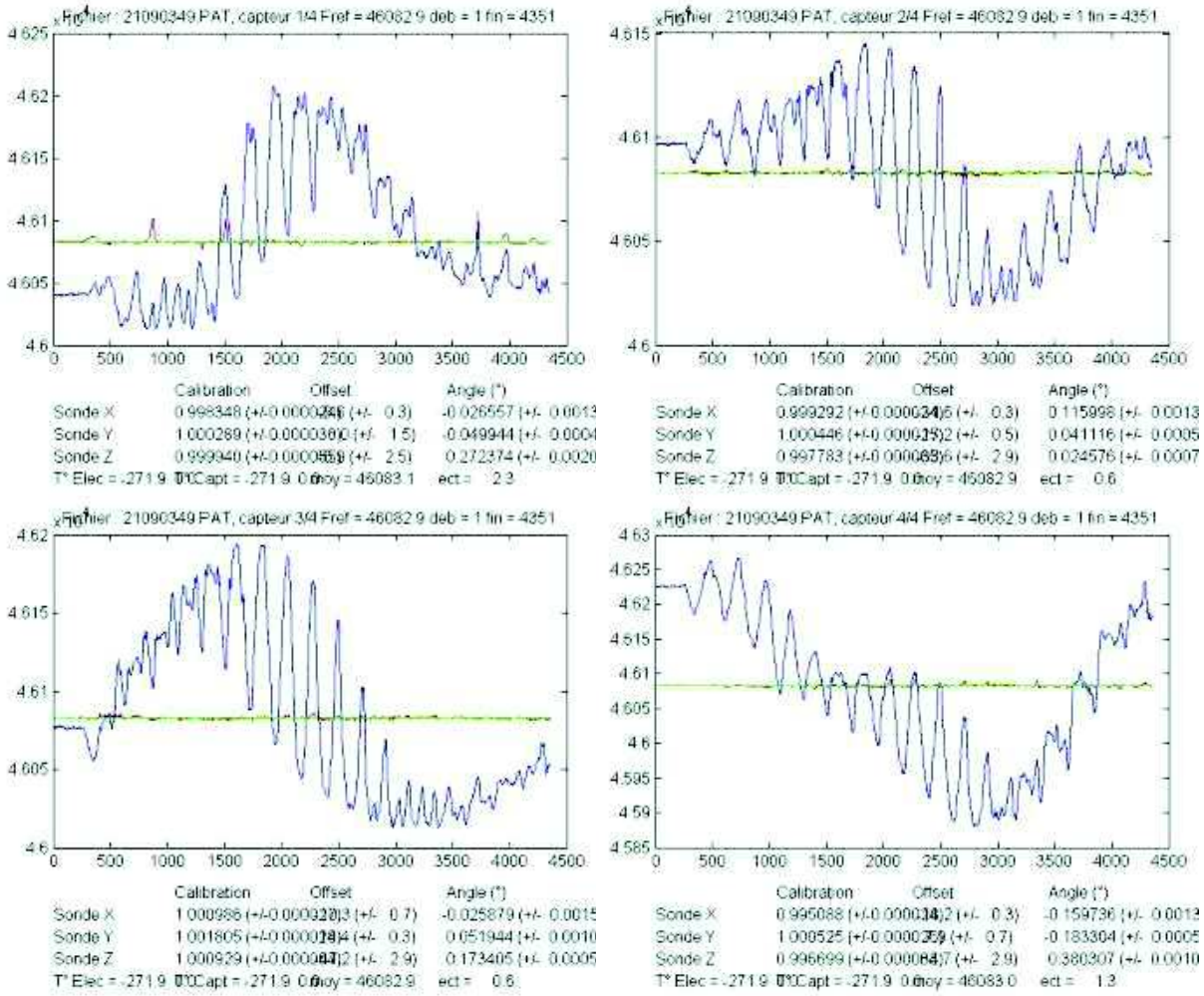


Figure 3.21 ***exemple d'étalonnage des quatre capteurs fluxgate. Les données non calibrées apparaissent en bleu, les données calibrées en rouge et le champ de référence constant en vert (46083 nT).***

De façon générale, on remarque que les écart-types après étalonnage sont plus forts pour les capteurs 1 et 4 (écart-types de 2,3 nT pour le capteur 1, 0,6 pour les capteurs 2 et 3 et 1,3 pour le capteur 4), c'est-à-dire pour les capteurs les plus éloignés de l'axe de la perche. Ceux sont ceux qui se déplacent le plus horizontalement et verticalement. Cela résulte du fait que le champ magnétique n'est pas strictement constant dans la zone d'étalonnage à la différence de ce qui est supposé du point de vue théorique. Les capteurs 1 et 4 se déplaçant plus, l'erreur est plus importante.

L'effet de l'étalonnage sur les données est important comme le montre la figure 3.22. Les variations de champ magnétique le long des profils sont de l'ordre de 200 nT avant étalonnage et correspondent aux défauts des capteurs et à la non compensation. Après étalonnage les variations ne sont plus que de quelques dizaines de nannoteslas et correspondent au champ d'anomalie.

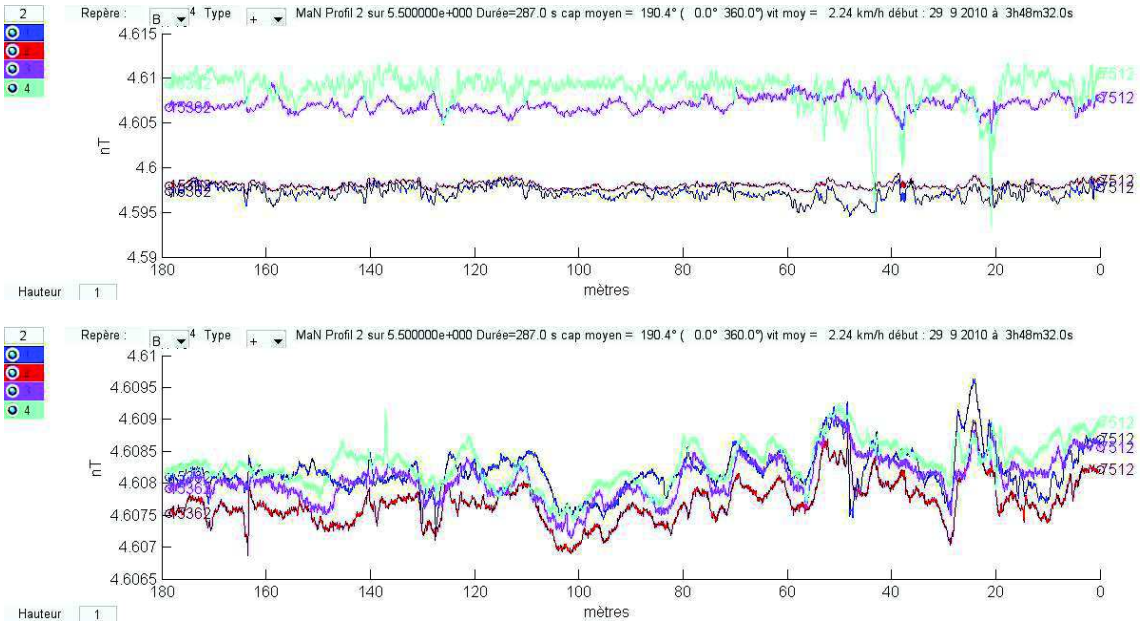


Figure 3.22 ***profil magnétique 2 de la cartographie 14 à l'ouest du Tell non étalonné (en haut) : Les variations de champ magnétique le long des profils sont de l'ordre de 200 nT ,et étalonné (en bas) : Après étalonnage les variations ne sont plus que de quelques dizaines de nannoteslas.***

8.2.2.ii. Définition des profils

Lors de l'acquisition, les mesures sont réalisées en quasi-continu (30 mesures à la seconde), sans interruption entre les profils. Les débuts et fins de profils sont identifiés. En pratique, il arrive que des marqueurs manquent ou soient mal placés et le logiciel de traitement permet de les redéfinir (Figure 3.23).

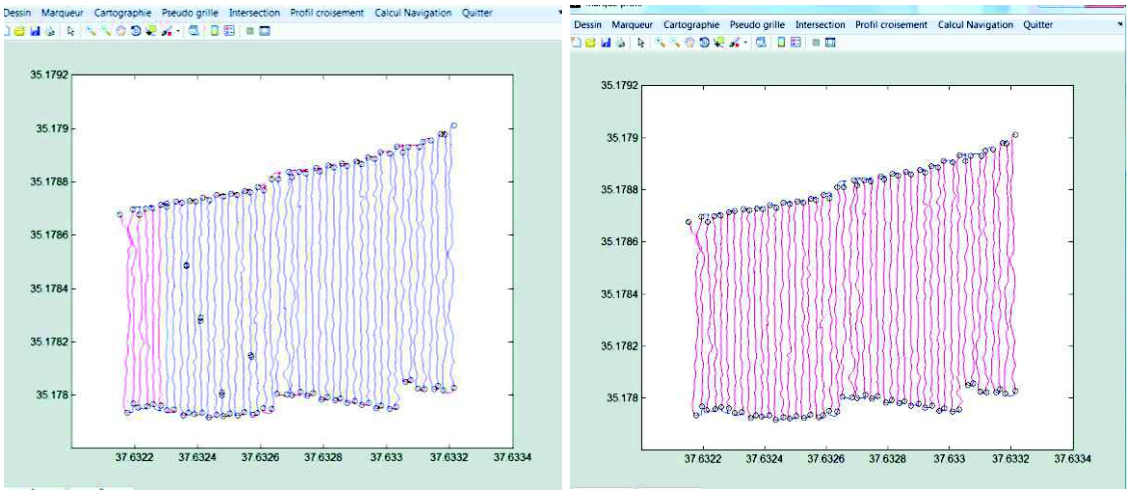


Figure 3.23 ***marquage des profils par l'action de l'opérateur à gauche et corrigés au traitement à droite.***

Au total, 92,9 km ont été parcourus en 47,1 heures durant les 16 jours de travail de la mission. 168 fichiers de données ont été acquis et ils représentent 169695 enregistrements magnétiques. La carte des routes suivies par l'opérateur est donnée en figure 3.24.

Figure 3.24 ***routes suivies pour les cartographies magnétiques au site d'Al-Rawda. Le point de calibration est indiqué par la croix rouge.***

8.2.3. Calcul des cartes magnétiques

Les données magnétiques des profils permettent de calculer des cartes de champ magnétique. En méthodes potentielles, la représentation de ces cartes se fait de façon classique en utilisant une palette de couleur linéaire en fonction de l'intensité du champ magnétique et selon ce que l'on veut voir, on change les seuils de visualisation. Le problème de ce mode de représentation est que des objets aimantés au sol produisent de fortes anomalies magnétiques et qu'il n'est alors pas possible d'observer les anomalies de plus faible amplitude. Inversement si on seuille fortement la carte, on ne voit plus les anomalies de forte amplitude. Pour remédier à ce problème, on utilise une représentation plus adaptée

en définissant l'échelle de couleur par équipopulation. Le logiciel calcule les seuils pour chacune des couleurs de telle sorte que chaque couleur occupe la même surface sur la carte d'anomalie magnétique. Cela permet de bien distinguer toutes les anomalies et de localiser leurs extrema. Cependant, l'échelle de couleur n'étant plus linéaire, il devient difficile de comparer les amplitudes des différents signaux observés ainsi que de se faire une idée des variations latérales (donc de délimiter précisément les structures en cause). Il est donc utile de visualiser les cartes en échelle linéaire et en équipopulation (Figure 3.25).

L'ensemble des cartographies magnétiques de l'EOST a été divisé en trois zones (centrale, sud et ouest). Les cartographies de la zone centrale ont eu pour but de compléter la carte magnétique déjà réalisée par S. Gondet.

8.2.3.i. Zone centrale

On calcule la carte de champ magnétique (Figure 3.25) avec un pas de 25 cm en utilisant l'ensemble des données de l'EOST dans la zone.

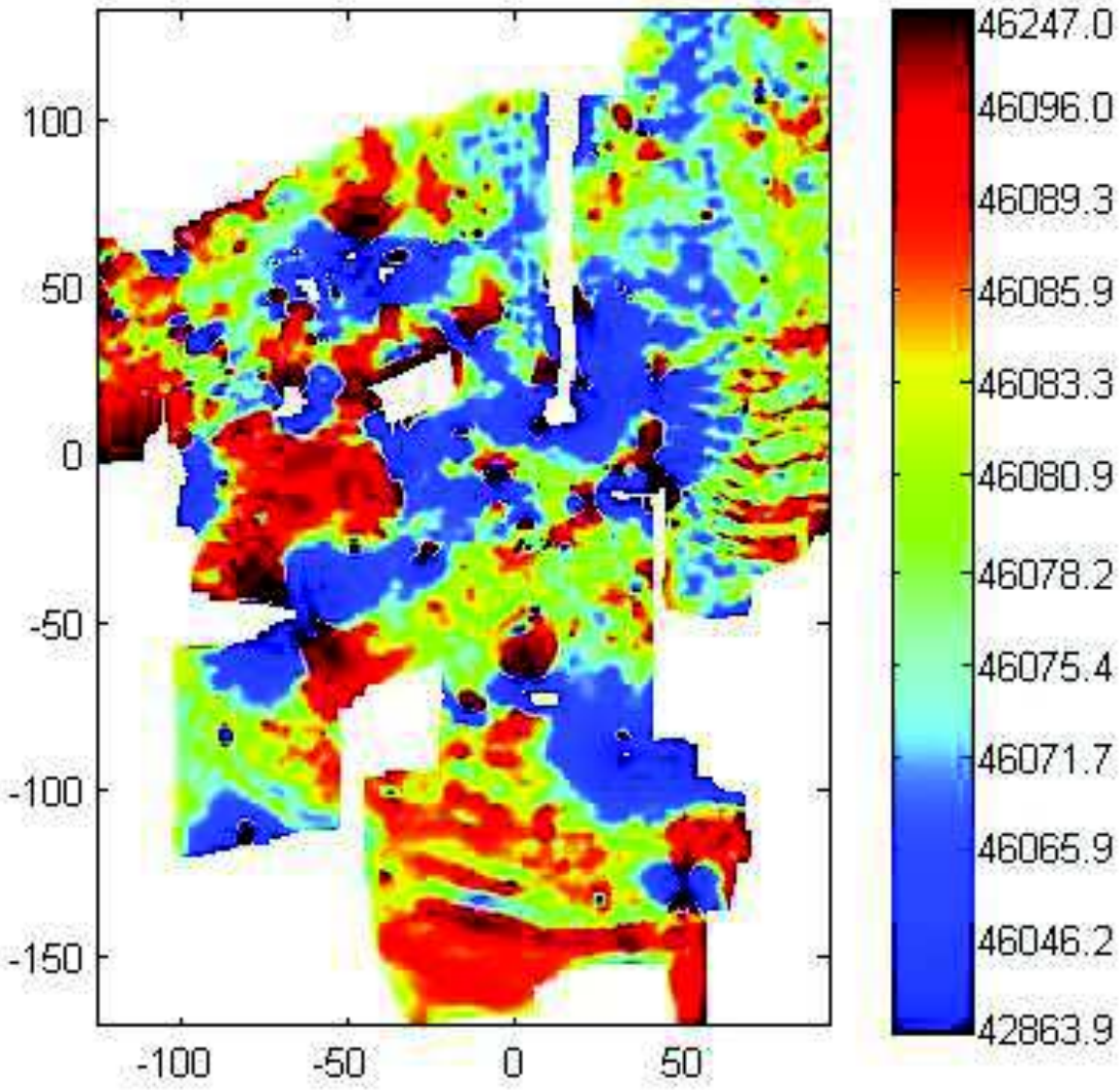


Figure 3.25 ***carte de champ magnétique de la zone centrale .L'échelle des cartes est en équi-population(données EOST 2010).***

La carte d'anomalie magnétique est obtenue en enlevant une constante. En effet pour une zone de surface aussi petite, la variation de l'IGRF est négligeable.

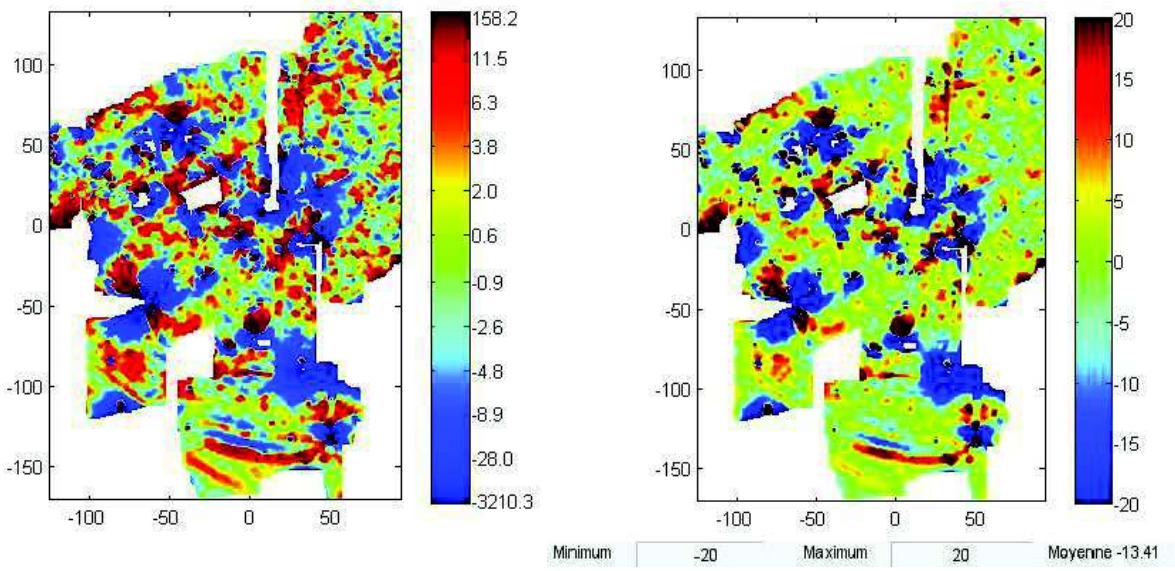


Figure 3.26 ***cartes de l'anomalie magnétique de la zone centrale en équipopulation à gauche, et linéaire entre -20 et 20 nT à droite (données EOST 2010).***

Sur ces cartes, on observe plus ou moins vaguement les rues radiales et les rues circulaires, par contre on ne peut pas bien définir l'architecture des bâtiments. Cela est normal, car il s'agit de cartes de champ et pas de cartes de dérivée verticale. La carte montre également de nombreuses zones ou points avec de fortes valeurs. Il s'agit de déchets métalliques présents sur l'ensemble du tell qui ont été rejetés par les habitants actuels. Malgré le ramassage des objets les plus volumineux, il restait sur le terrain de nombreux petits fragments, parfois enfouis. La présence aussi de piquets en fer, des maisons, des murs de clôture et des pylônes électriques a causé des perturbations importantes des mesures.

8.2.3.ii. Sud du tell

Trois cartographies magnétiques ont été réalisées au sud du tell avec des profils d'une longueur d'environ 120 m. La carte de champ magnétique est présentée à la figure 3.27.

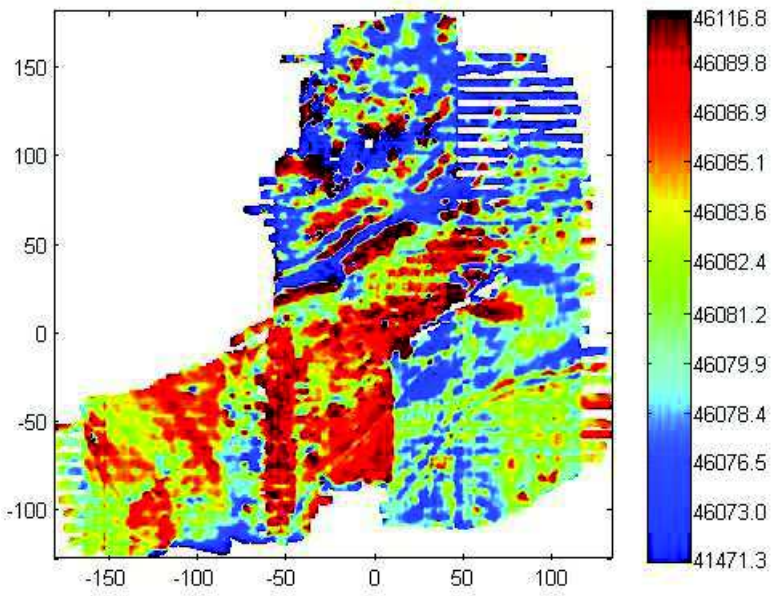


Figure 3.27 ***Carte de champ magnétique au sud du tell en équipopulation (données EOST 2010).***

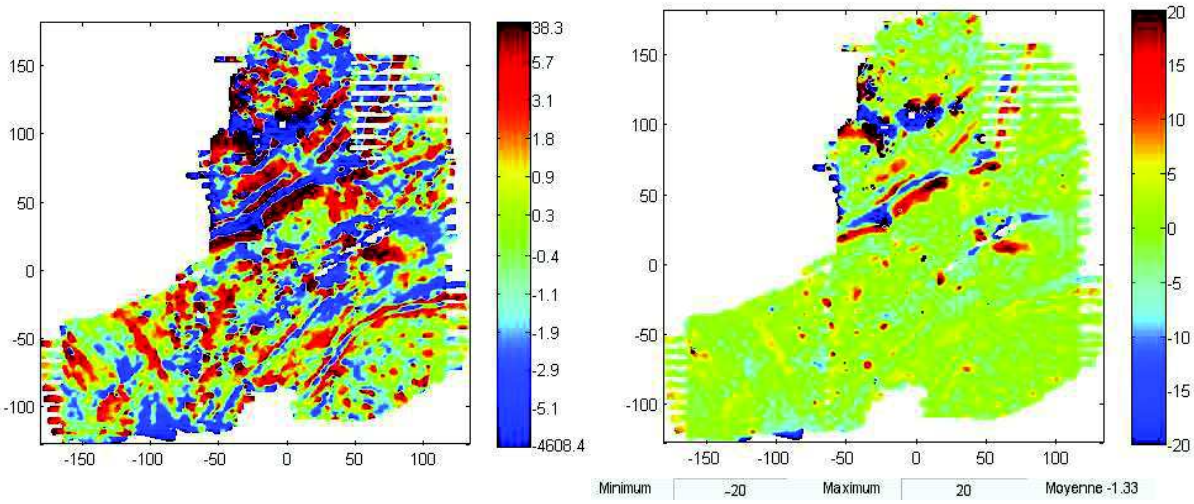


Figure 3.28 ***carte de l'anomalie magnétique au sud du tell en équipopulation à gauche et en échelle normale seuillée entre -20 et 20 nT à droite.***

La carte d'anomalie magnétique en échelle normale (Figure 3.28, à droite) montre les anomalies magnétiques de plus forte amplitude qui pourraient correspondre à des lentilles de cendre et des anomalies magnétiques plutôt dipolaires (objets ponctuels). On observe également sur la carte d'anomalie magnétique en équipopulation (Figure 3.28 à gauche) des anomalies magnétiques de plus grande longueur d'onde qui correspond vraisemblablement à des variations lithologiques naturelles qui pourraient être associées à l'oued.

8.2.3.iii. Ouest du tell

À l'ouest du tell des cartographies magnétiques ont été réalisées pour imager le sous-sol à l'extérieur du rempart. Dans la zone cartographiée, à l'ouest, on trouve un champ d'oliviers régulièrement espacés et attachés à des piquets en métal qui perturbent les mesures comme le montre la carte d'anomalie (Figure 3.29). On observe aussi une linéation à peu près est-ouest qui n'est reliée à aucune observation au sol. Enfin le fossé est clairement visible à l'est de la carte.

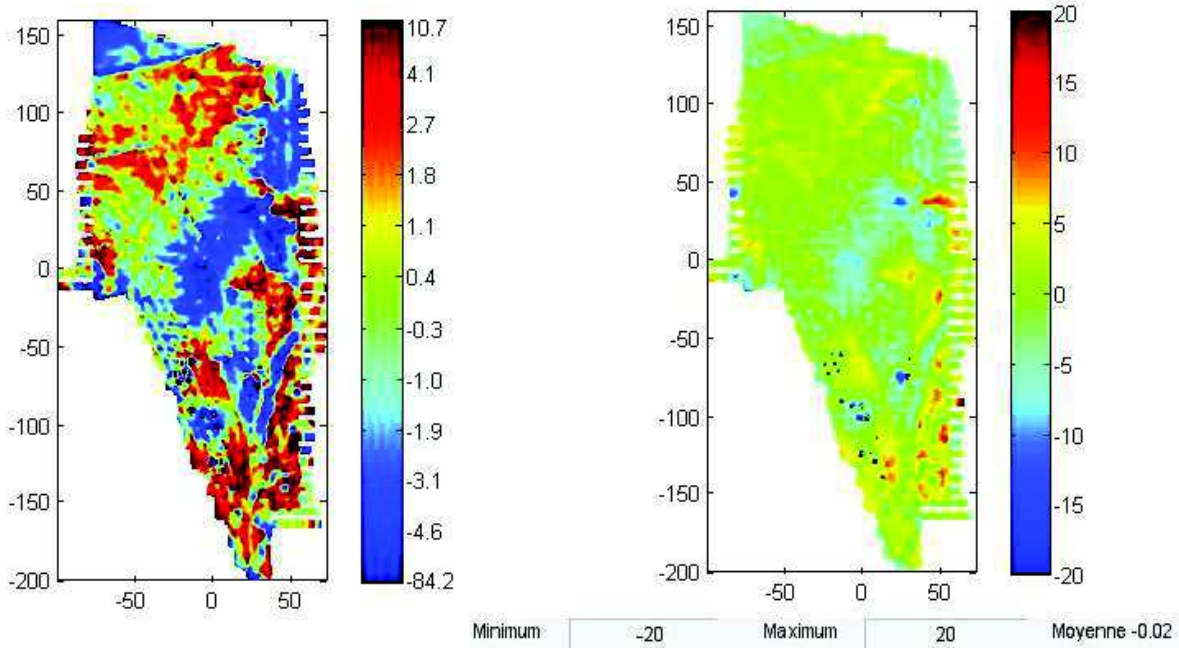


Figure 3.29 ***carte de l'anomalie magnétique à l'ouest du tell en équipopulation à gauche et en échelle normale seuillée entre -20 et 20 nT à droite.***

8.2.3.iv. Cartographie magnétique à la luge

C'est sur le site d'Al-Rawda que le laboratoire a fait pour la première fois une cartographie magnétique avec les capteurs placés à 10 cm du sol. Le lieu choisi est celui d'un temple qui avait été identifié à partir de la carte de gradiométrie de S. Gondet, La route suivie par la luge est présentée à la figure 3.30 et la carte d'anomalie magnétique à la figure 3.31. Pour permettre le déplacement de la luge, il a fallu enlever les obstacles sur le sol, en particulier des pierres.

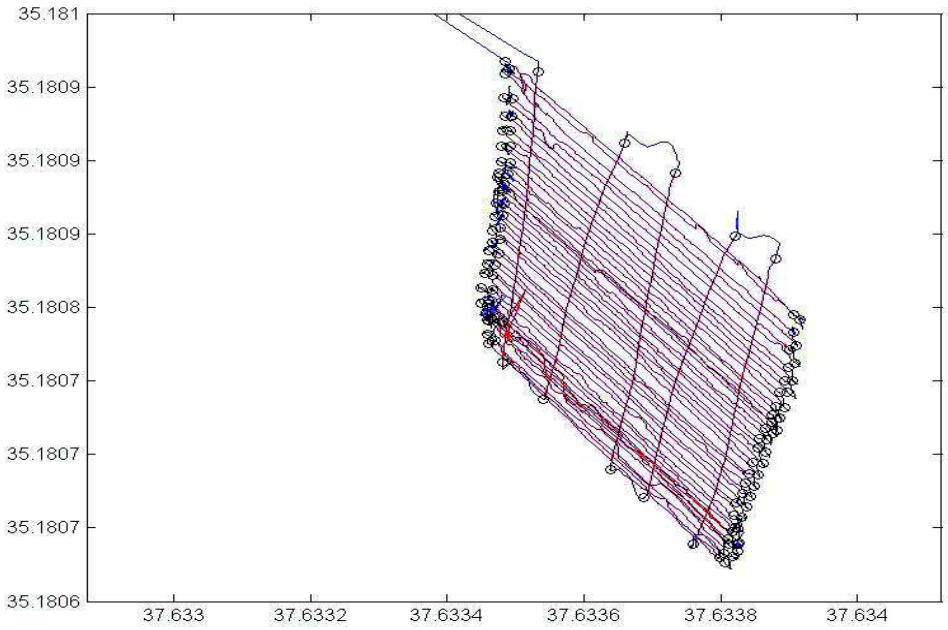


Figure 3.30 ***Route suivies pour la cartographie à la luge.***

47 profils et 5 traverses ont été réalisés, les profils étant espacés de 50 cm. La grille calculée a un pas de 5 cm.

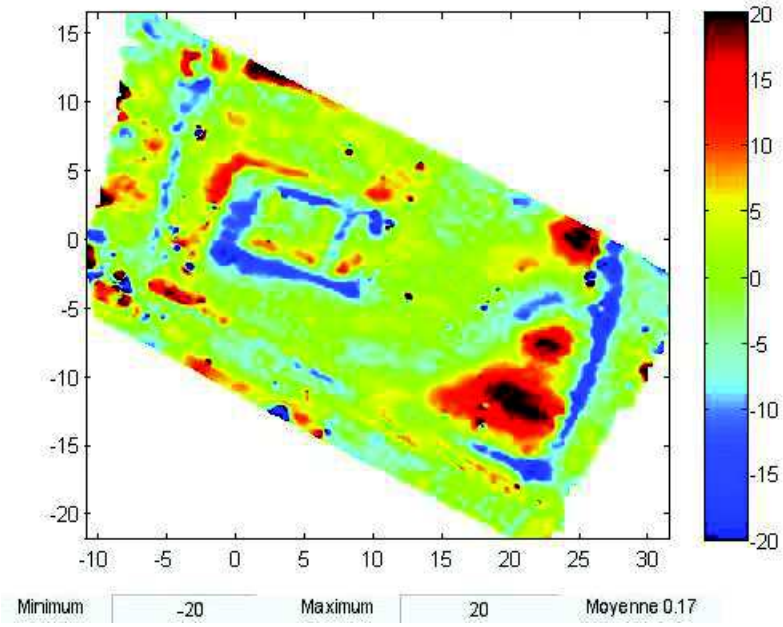


Figure 3.31 ***carte de l'anomalie magnétique du temple à la luge représentée en échelle normale seuillée entre -20 et 20 nT.***

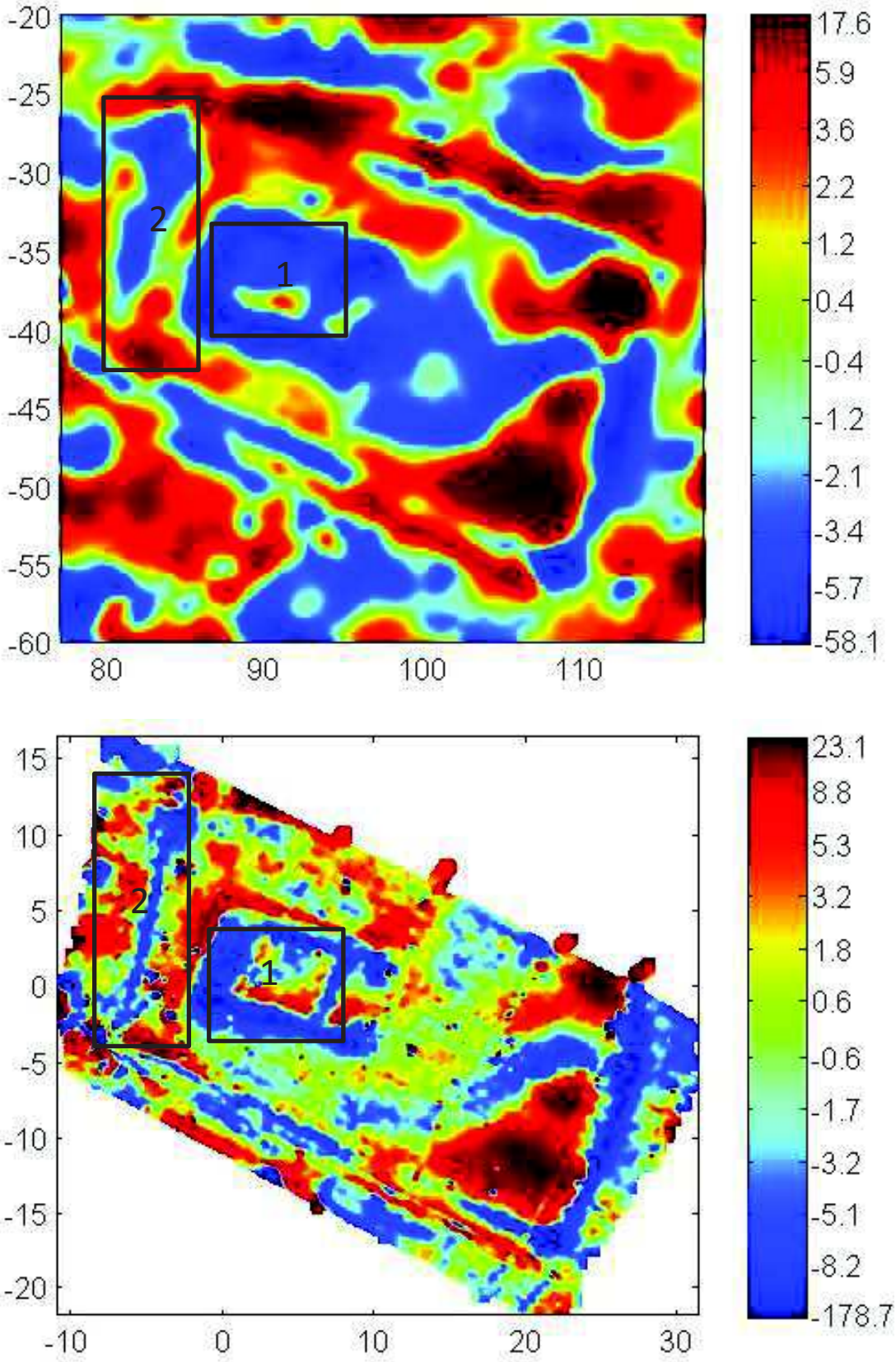


Figure 3.32 ***Comparaison entre les cartes d'anomalie magnétique du temple obtenue à la perche en haut et à la luge en bas.***

La figure 3.32 montre, à la même échelle les deux cartes magnétiques, à la perche et à la luge. L'amélioration de la précision de l'imagerie des structures et importante, par exemple la structure carrée qui est marqué dans la figure 3.32 par le rectangle 1. On remarque également que la ligne qui est marquée sur le rectangle 2 apparait plus fine dans la carte à la luge. Par ailleurs, l'amplitude des anomalies augmente, ce qui rend le rapport signal sur bruit meilleur. Cependant la méthode à la luge est plus lente à mettre en œuvre. Il faut environ une heure pour mesurer un carré de 20 m de côté et les mesures nécessitent un terrain assez régulier afin qu'il n'y ait pas trop d'à-coups sur les capteurs. C'est pour cette raison que l'on n'utilise cette méthode que lorsque les archéologues ont un intérêt particulier.

8.3. Compilation des données

Finalement on a rassemblé l'ensemble des données du laboratoire de Lyon traitées avec nos méthodes avec les données acquises par l'EOST (Figure 3.33).

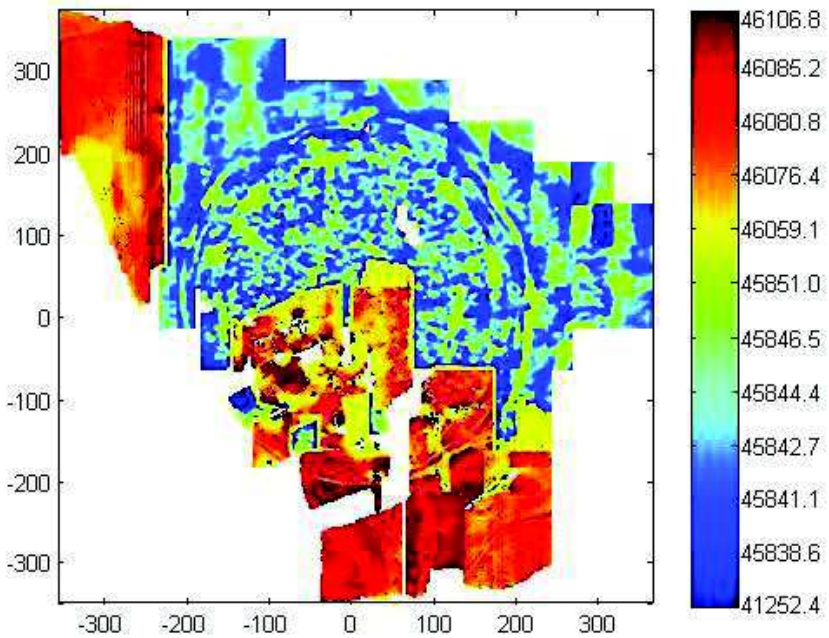


Figure 3.33 ***carte de champ magnétique du site d'Al-Rawda (données de S.Gondet et données de l'EOST).***

On a déjà signalé le problème de l'absence de la correction temporelle qui fait que les deux jeux de données sont décalés de plus de 150 nT. Par ailleurs, pour correspondre aux mieux aux données de l'EOST, on a utilisé les données du capteur bas plutôt que celles du capteur haut. Pour supprimer le décalage, il n'y a pas eu d'autre solution que d'utiliser la carte d'anomalie magnétique des données de Lyon, en enlevant la médiane à chacun des profils de données magnétiques. Pour les trois cartes magnétiques de l'EOST, on a enlevé sa moyenne à la carte de champ magnétique. La carte magnétique finale obtenue ne montre pas de problème particulier de jonction entre les jeux de données (Figure 3.34 et 3.35). On observe bien le rempart, les rues radiales et circulaires, des variations liées à la lithologique

au sud et l'ouest du tell et des fortes anomalies magnétiques dipolaires qui résultent de la présence d'objets métalliques surtout dans la partie sud-ouest du tell où l'occupation actuelle est la plus importante.

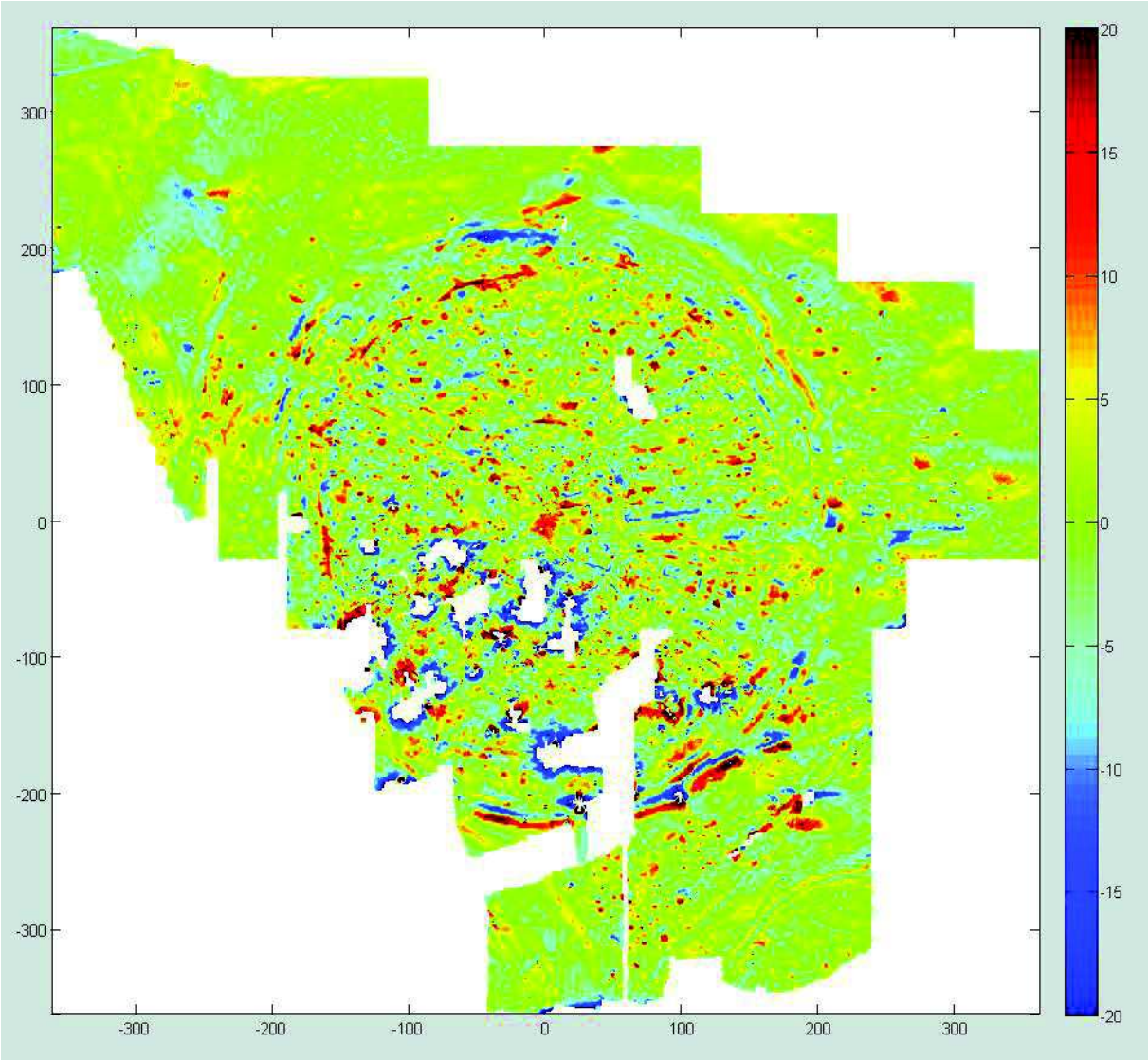


Figure 3.34 ***carte d'anomalie magnétique du site d'Al-Rawda en échelle linéaire seuillée entre -20 et 20 nT (données de S.Gondet et données de l'EOST).***

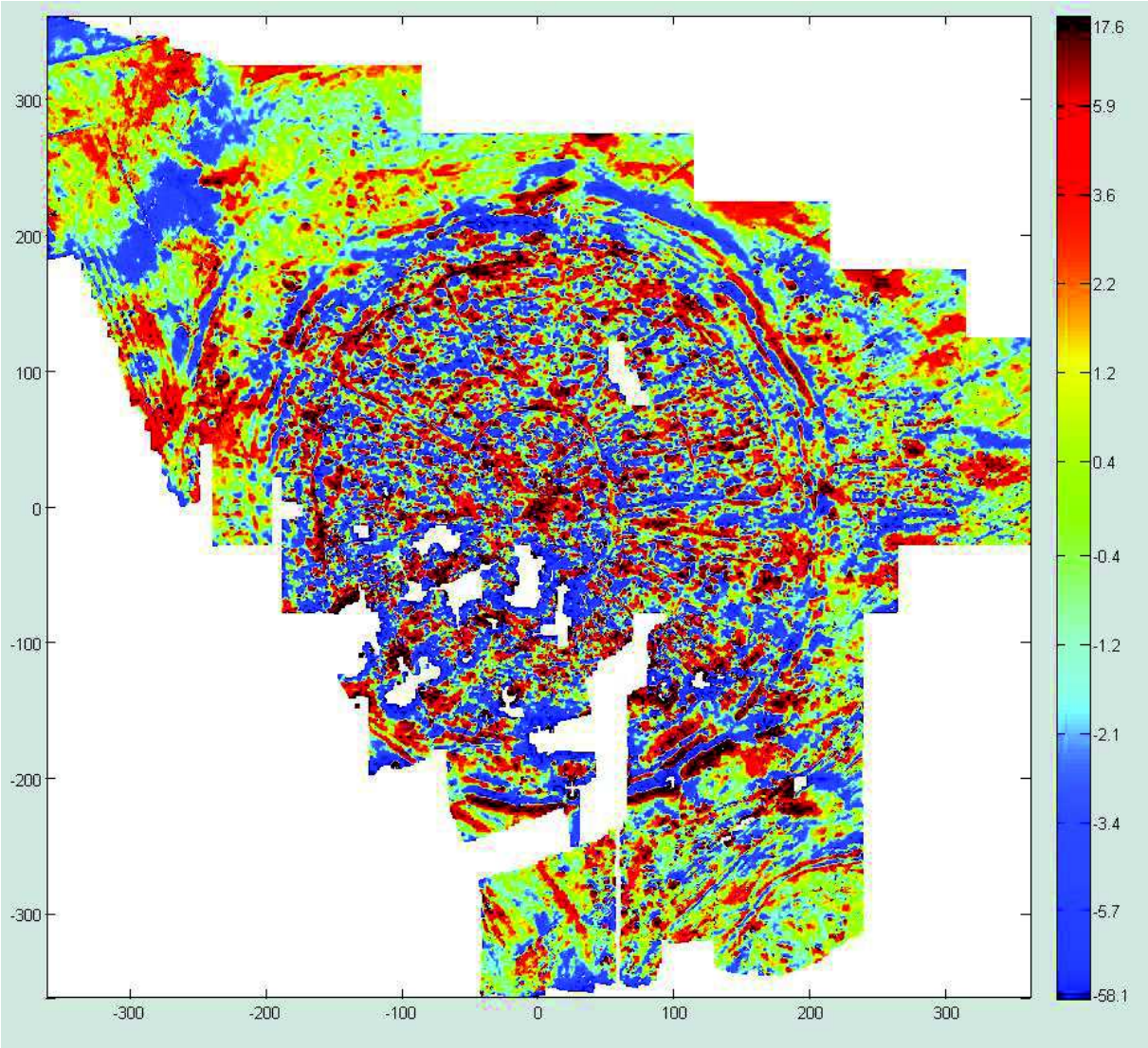


Figure 3.35 ***carte d'anomalie magnétique du site d'Al-Rawda en équipopulation (données de S.Gondet et données de l'EOST).***

9. Site de Tell Sh'airat

9.1. Mesures magnétiques du laboratoire de Lyon

Quatre campagnes de gradiométrie ont été réalisées, les deux premières par S. Gondet (UMR5133 Archéorient) en 2004 et 2006 et les deux suivantes par C. Benech en 2009 et 2010.

Les prospections ont été réalisées au moyen d'un gradiomètre scalaire Geometrics G858 et dans les mêmes conditions qu'à Al-Rawda. Des carrés de 50 x 50 m ont été implantés au sol, mais sur les bords du tell, leur surface a été réduite à approximativement le rectangle correspondant à la topographie. (Figure 3.36). Au total 116 zones de mesure ont été définies. Les profils sont espacés de 1 m et la cadence des mesures est de 0,1 s. Le même type de problème de géoréférencement des mesures qu'à Al-Rawda se pose mais il est plus grave ici comme le montre la figure 3.36. On observe que la carte de gradiométrie doit être tournée légèrement dans le sens antihoraire pour se superposer à l'image aérienne.

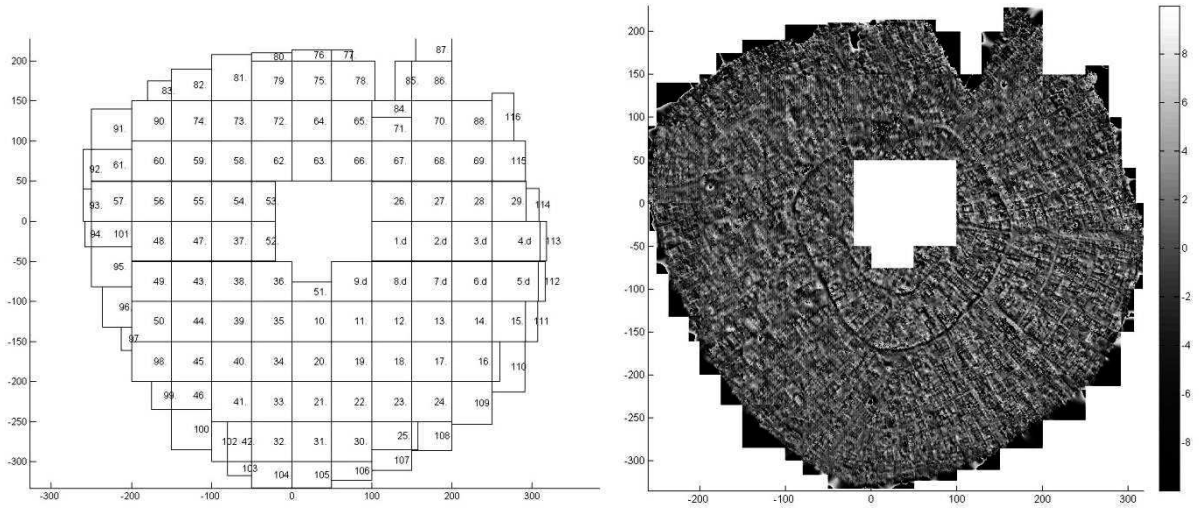


Figure 3.36 ***Carrés des mesures à gauche et cartes de gradiométrie sur le tell Sh'airat à droite.***

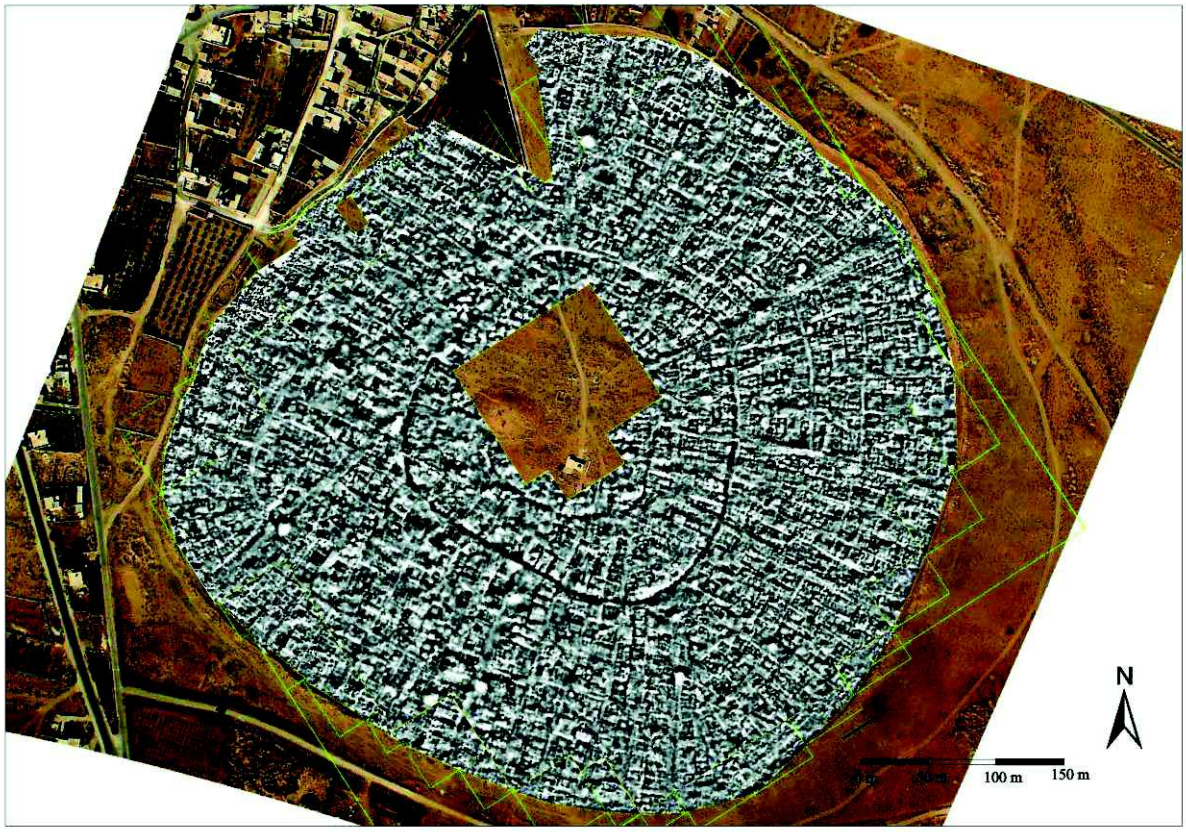


Figure 3.37 ***Carte de gradiométrie verticale (campagnes de 2004, 2006, 2009 et 2010) recalée approximativement avec la photo aérienne S. Gondet. Collaboration Mission archéologique d'Al-Rawda/ Mission de Tell Sh'airat.***

On a fait le même type de traitement de données que pour le tell Al-Rawda.

Pour deux zones, 15 et 16, les capteurs haut et bas sont inversés. Les données de la zone 89, n'ont pas été fournies.

On a identifié le bon décalage horizontal (festonnage). La valeur généralement utilisée est de 0,5 m, mais pour de nombreux carrés il a fallu établir d'autres valeurs entre 0 et 1 m. Nous n'avons pas trouvé d'explication à ces incohérences.

Le problème de levelling a été traité de la même façon que pour le tell Al-Rawda.

Par contre un problème particulier est rapidement apparu. Selon les carrés, les profils sont parcourus en aller-retour ou bien toujours dans la même direction. Cela atténue le levelling, par contre la procédure de calcul de festonnage a dû être revue pour prendre en compte cette direction de profils.

Le géoréférencement des coordonnées locales en mètres des fichiers de données s'est fait de la façon suivante. Pour l'origine du repère local, on attribue une longitude de 36.947989°E et une latitude de 34.488704°N. Pour l'altitude, on a considéré que toutes les

mesures ont été prises à une altitude constante de 500 m. Il a fallu en plus tourner le repère local de 12 degrés dans le sens antihoraire.

9.2. Données magnétiques de l'EOST

Les prospections magnétiques du laboratoire de Lyon n'ont pas permis de couvrir la partie la plus centrale du tell à cause de l'existence d'un cimetière récent. Par ailleurs, aucune cartographie n'a été réalisée à l'extérieur du tell alors que les archéologues supposent la possibilité d'une occupation à l'est du tell. Ces deux considérations ont conduit à proposer des cartographies magnétiques complémentaires du 12 au 18 octobre 2010.

Le même équipement de mesure de l'EOST que celui mis en œuvre à Al-Rawda a été utilisé, mais le système de visualisation temps réel ne fonctionnait pas, ce qui a rendu les opérations nettement plus longues. Treize cartographies ont été réalisées en une semaine et tous les étalonnages ont été faits au même point. Au total, 54,1 km ont été parcourus en 21,9 heures durant les 7 jours de travail de la mission ce qui représente une surface d'environ 10 ha (Figure 3.38). Les cartographies sont regroupées en deux zones, celle du centre du tell et celle de la ville basse à l'est du tell.

9.2.1. Traitement les donnés

Le traitement des données est exactement le même que celui fait à Al-Rawda.

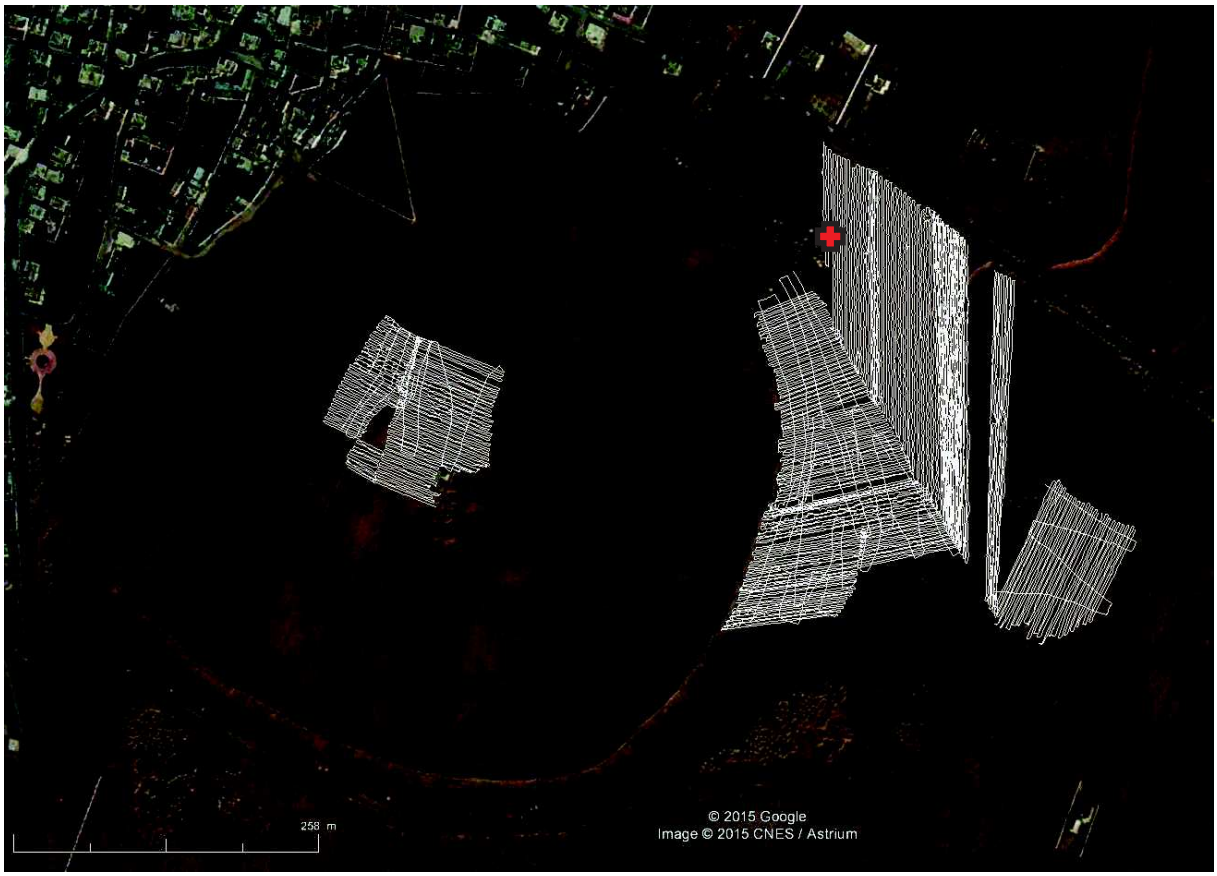


Figure 3.38 ***Routes suivies pour les cartographies magnétiques de l'EOST au site de Sh'airat, le point de calibration est indiqué par la croix rouge.***

9.2.2. Cartographie magnétique de la zone centrale

La surface topographiée est d'environ 2,5 ha. Elle contient de nombreux objets anthropiques en surface en particulier des tombes qui dégradent la qualité des données. Au nord-est de la carte on observe une grande structure rectangulaire d'une longeur d'environ 40 m et large d'environ 20 m. Une autre structure plus carrée apparait au centre de la carte (Figure 3.39).

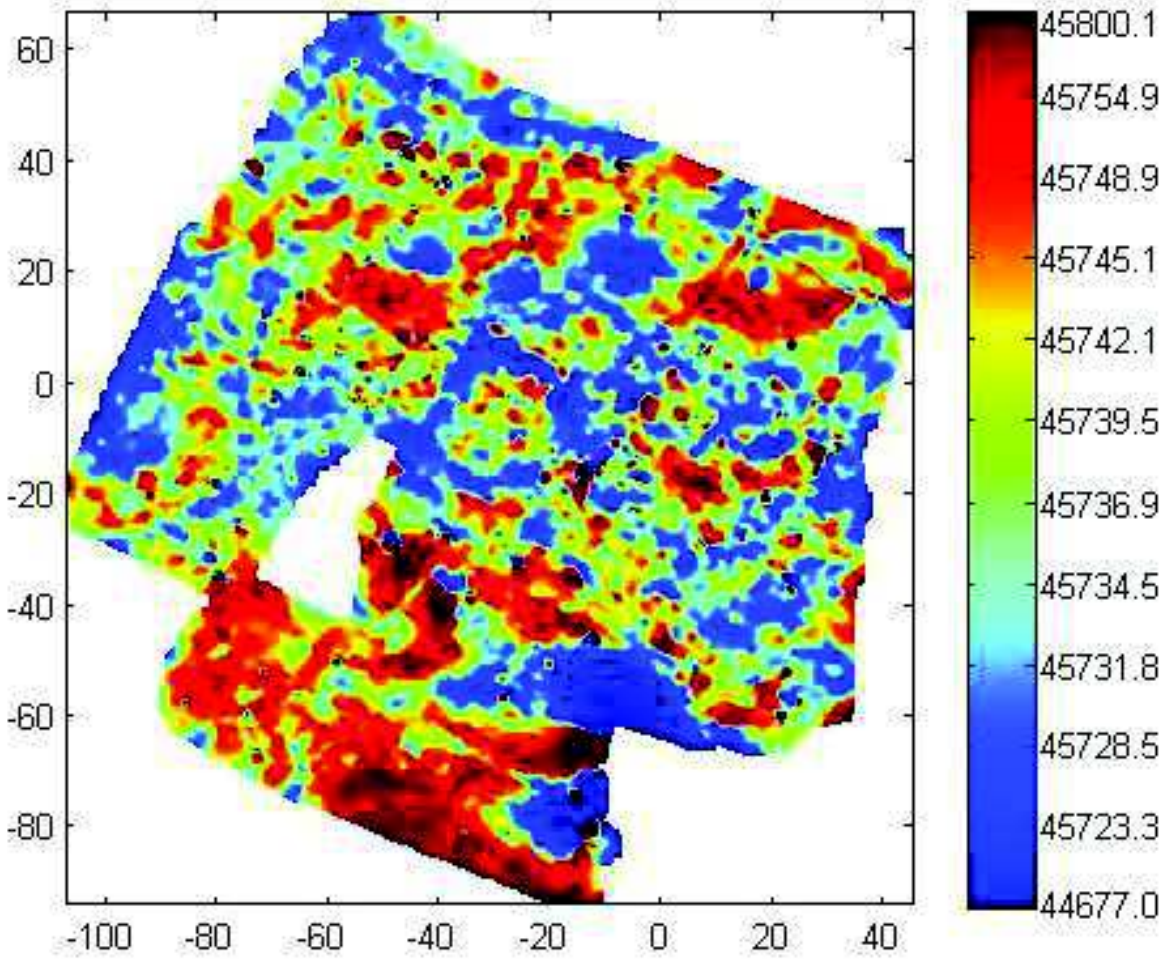


Figure 3.39 ***Carte de champ magnétique de la zone centrale en équipopulation(donnés l'Eost 2010).***

9.2.3. Cartographie magnétique dans la ville basse

À l'est du tell environ 7,3 ha ont été couverts. La zone est difficile à cartographier en raison de la présence de nombreux dépotoirs récents qui contiennent d'assez nombreux déchets métalliques (Figure 3.40). Des chemins traversent aussi la zone de mesure et leur présence est observée sous forme d'anomalies magnétiques (Figure 3.41).

Figure 3.40 ***(Photographie : Georges MOUAMAR) © Mission archéologique syrienne de Tell Sh'airat.***

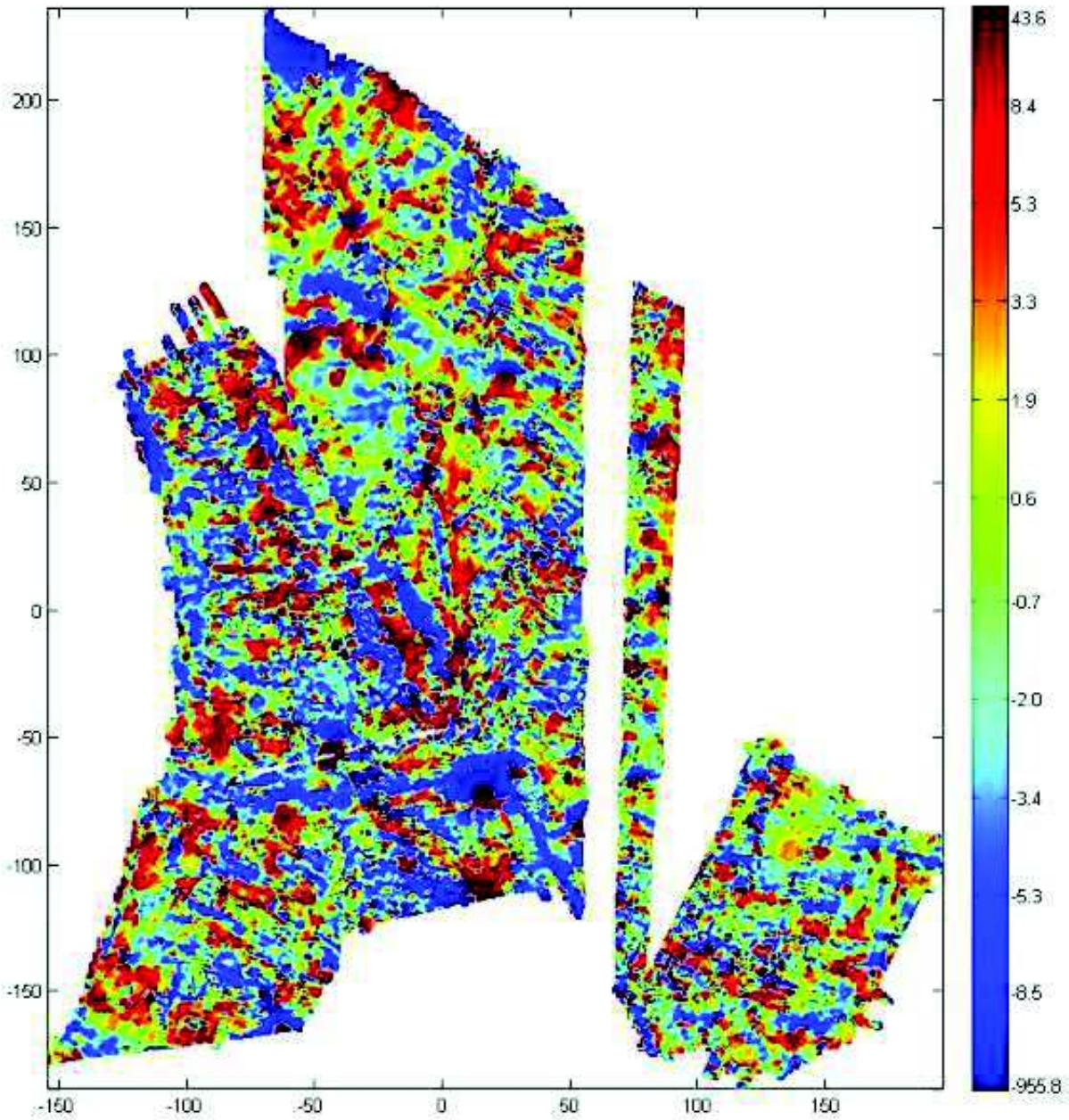


Figure 3.41 ***carte d'anomalie magnétique de la zone à l'est du tell en équipopulation(donnés l'Eost 2010).***

9.3. Compilation des données

La procédure est la même que celle utilisée pour le site d'AL-Rawda. On rencontre le même problème d'absence d'information sur le temps des mesures acquises par le laboratoire de Lyon. Les cartes de champ sont décalées de plus de 300 nT (Figure 3.42). Par ailleurs, pour correspondre aux mieux aux données de l'EOST on a utilisé les données du capteur bas plutôt que celles du capteur haut. Pour supprimer le décalage, il n'y a pas eu d'autre solution que d'obtenir la carte d'anomalie magnétique des données de Lyon, en enlevant la médiane à chacun des profils de données magnétiques. Pour les deux cartes magnétiques de l'EOST, on a enlevé sa moyenne à la carte de champ magnétique. La carte magnétique finale obtenue ne montre pas de problème particulier de jonction entre les jeux de données (Figure 3.43 et 3.44).

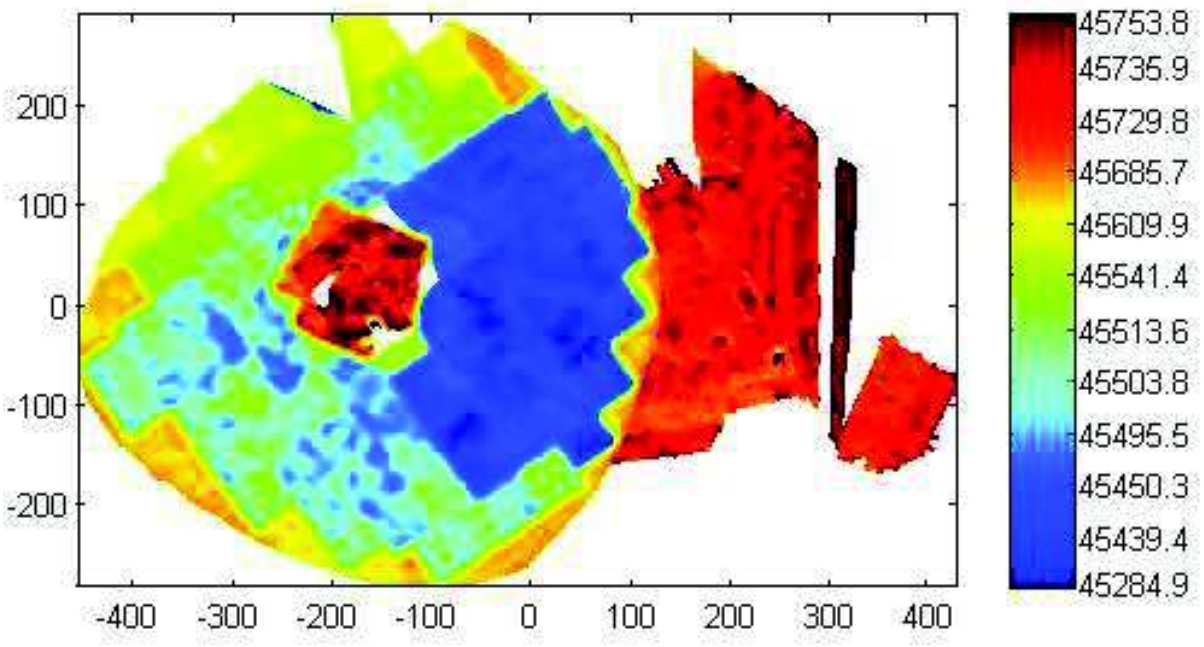


Figure 3.42 ***carte de champ magnétique complète du tell Sh'airat (données de S.Gondet et données de l'EOST).***

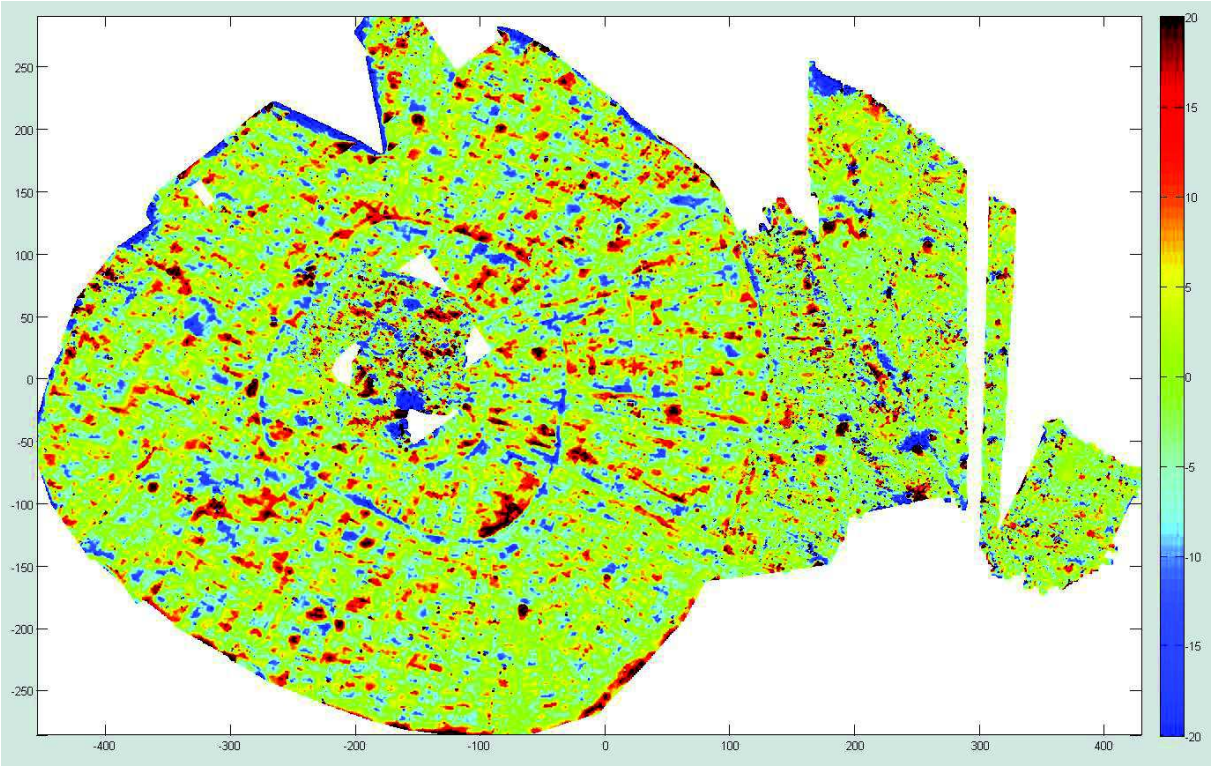


Figure 3.43 ***carte d'anomalie magnétique de l'ensemble des données de tell Sh'airat données de S.Gondet et données de l'EOST) représentées en échelle linéa seuillée entre -20 et 20 nT.***

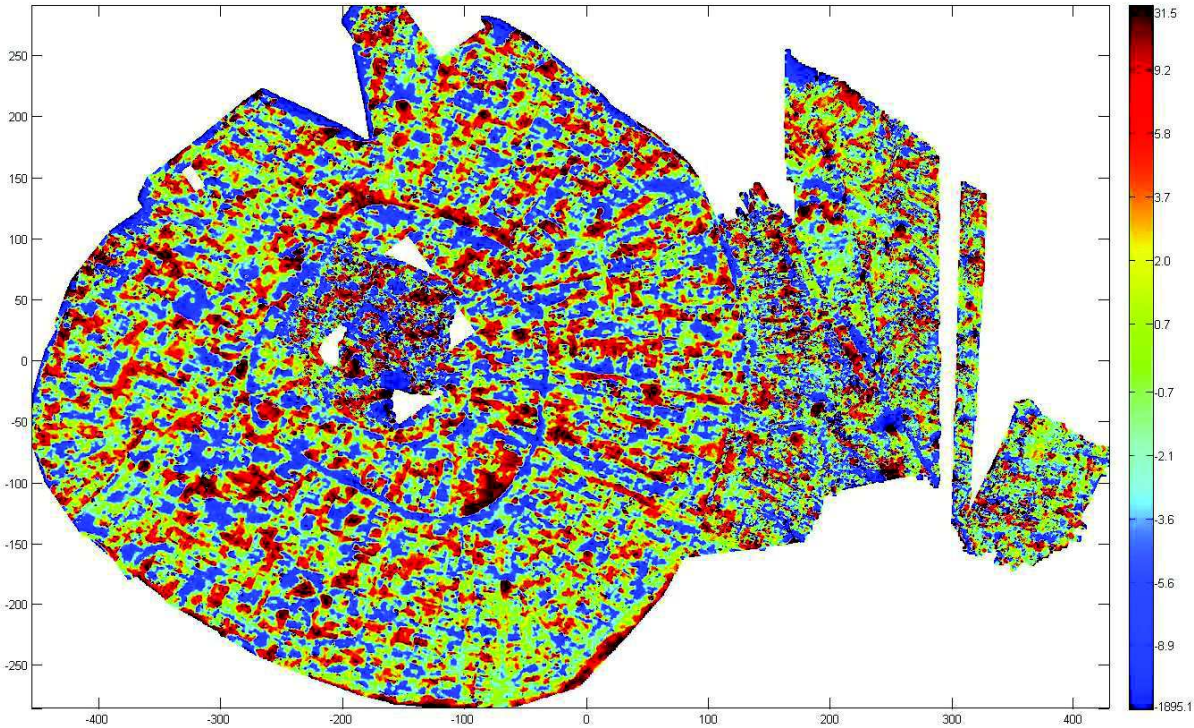


Figure 3.44 ***carte d'anomalie magnétique de l'ensemble des données (données de S.Gondet et données de l'EOST) de tell Sh'airat. représentées en équipopulation.***

10. Site de Tell Malhat Ed-Deru

En aout et septembre 2010, 16 jours de cartographie magnétique ont été réalisés sur le site de Malhat Ed-Deru. L'objectif de cette campagne de mesure était de réaliser pour la première fois une cartographie magnétique haute résolution du tell qui a une superficie d'environ 24 ha afin d'imager le plan des structures archéologiques.

À l'arrivée sur le site, un problème concernant le récepteur GPS Trimble 5800 a été rencontré et le système de positionnement ne pouvait pas fonctionner. Il est vraisemblable qu'il s'agissait d'un problème lié au pilotage informatique du récepteur GPS sans que cela soit une certitude. En tout cas, il n'a pas été possible de le faire fonctionner correctement et la cartographie magnétique a dû être réalisée de manière relative ce qui a occasionné une perte importante de temps.

Par ailleurs les conditions climatiques étaient telles qu'il n'était pas possible de faire plus de 4 à 5 heures de mesures par jour. Cela fait que la totalité du site n'a pas pu être cartographiée.

10.1. La cartographie magnétique

La cartographie magnétique a consisté à réaliser des carrés de 50 x 50 m puis de prendre avec un GPS à main les coordonnées des quatre coins. Finalement 53 carrés ont été couverts en 12 jours et la figure 3.45 montre la localisation des carrés.

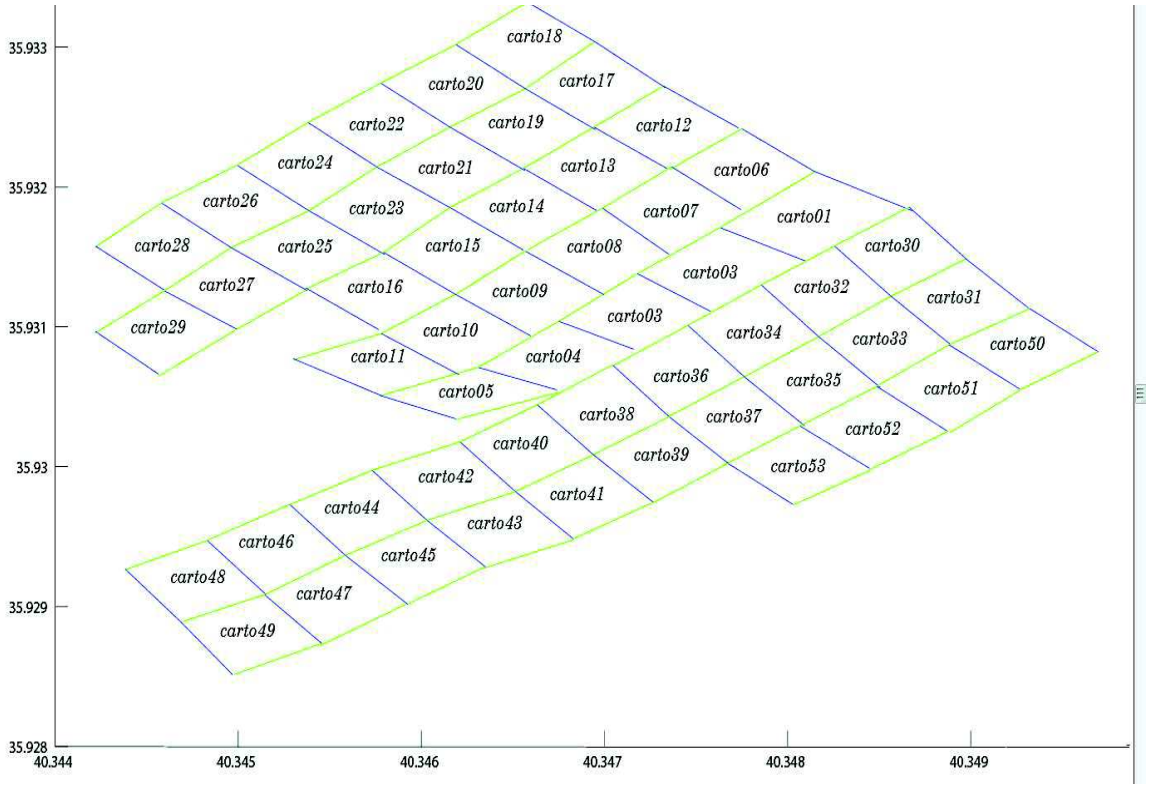


Figure 3.45 ***localisation des carrés des cartographies réalisées à Malhat el Deru.***

10.2. Traitement les donnés

Le programme du laboratoire a dû être adapté à ce cas particulier d'acquisition de données magnétiques sans positionnement GPS. Les procédures suivantes ont été adoptées :

- lecture et contrôle des données magnétiques,
- saisie des points GPS des angles des carrés (Figure 3.46),

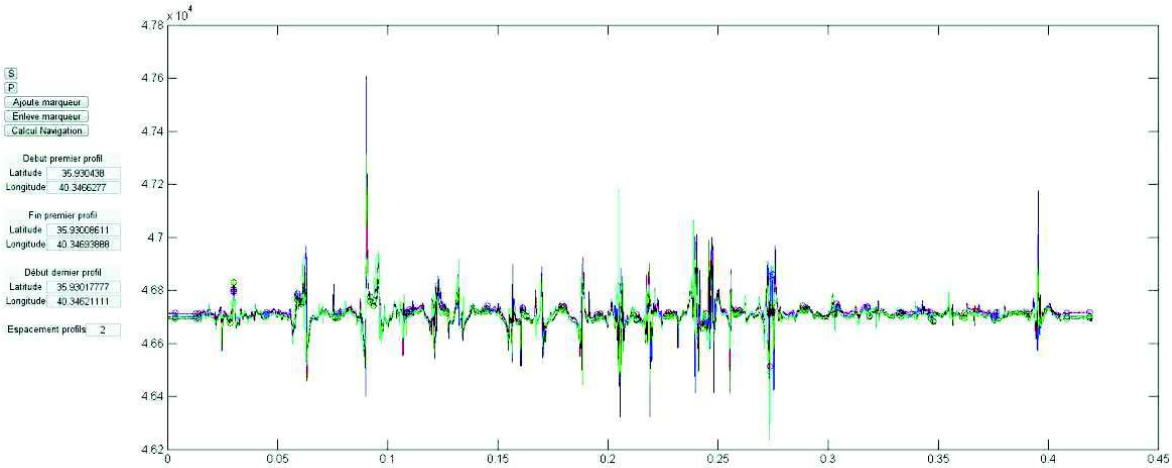


Figure 3.46 ***image montrant l'introduction des coordonnées GPS et les mesures de champ magnétique pour un des carrés.***

- calcul de la localisation des données magnétiques à l'aide de ces références (Figure 3.47).

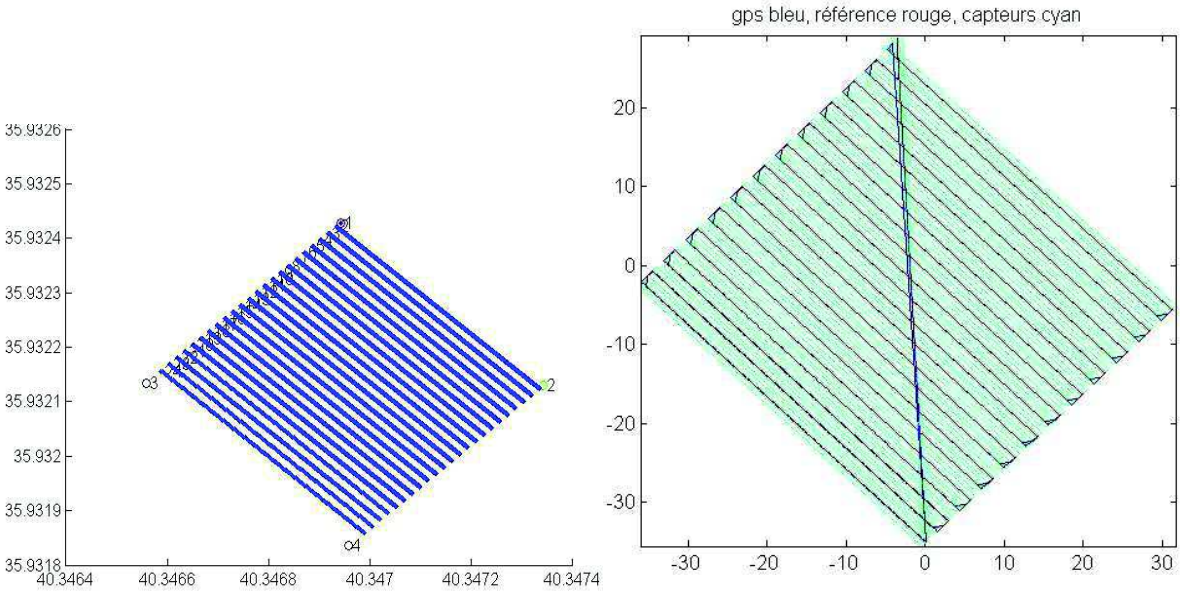


Figure 3.47 ***calcul de la navigation d'un des carrés à gauche et position des quatre capteurs magnétique (cyan) à droite.***

Pour que les données magnétiques soient bien positionnées, il faut que l'opérateur ait marché à vitesse constante le long de chacun des profils. Par ailleurs, dans quelques cas, l'opérateur n'a pas correctement identifié le début ou la fin de profil en agissant sur la poignée de commande. Il a alors fallu trouver par tatonnement le point de mesure magnétique correspondant.

Pour le reste, le traitement des données conduisant à la carte de champ magnétique est similiare à ce qui a été fait pour les deux autres sites, à savoir

- vérification des données magnétiques par édition des profils,
- calcul de l'anomalie magnétique sur profils par médiane,
- calcul de la grille d'anomalie magnétique avec un pas de 0,25 m.

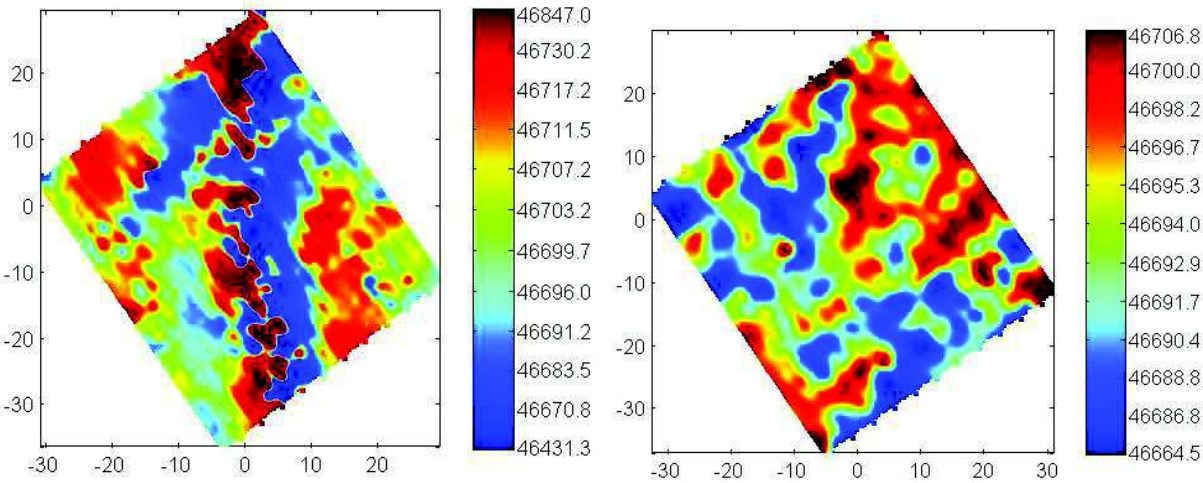


Figure 3.48 ***carte de champ magnétique du carré 40 à gauche et du carré 46 à droite montre le fait d'une vitesse non constante au long de profil sur la carte carré 40.***

Sur la carte de champ magnétique du carré 40 (Figure 3.48, à gauche), on voit apparaitre du festonnage. On explique cela à cause d'une vitesse non constante le long des profils. Il faut bien noter que cette cartographie a été faite sur le rempart où il est à la fois difficile de marcher droit et à vitesse constante. Par contre, pour le carré 46 dans la ville basse (Figure 3.48, à droite) où le terrain est assez plat, on ne voit pas de problème particulier.

10.3. Calcul de la carte magnétique

Finalement, les 53 cartographies sont assemblées dans un fichier unique et la carte de champ magnétique générale est calculée avec un pas de 0,25 m (Figure 3.49).

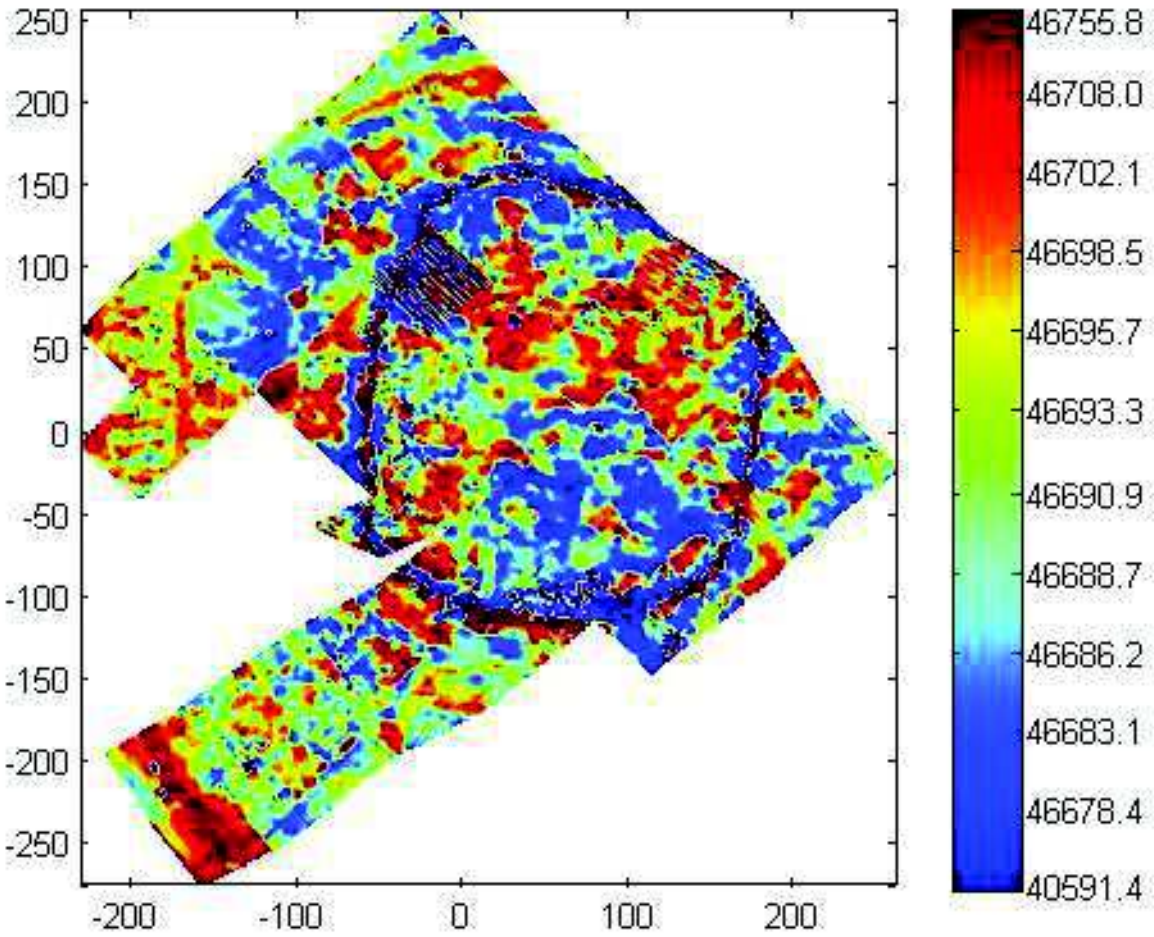


Figure 3.49 ***carte de champ magnétique du site de Tell Malhat Ed-Deru représentées en équipopulation montre du leveling pour certains profils.***

La carte de champ magnétique montre du leveling pour certains profils. Ce problème disparait en calculant l'anomalie magnétique en enlevant sa médiane à chacun des profils magnétique (Figure 3.50 et 3.51).

De façon générale, la carte d'anomalie montre des anomalies magnétiques de fortes amplitudes au niveau de l'enceinte intérieure et le seuil choisi pour la représentation en échelle linéaire (Figure 3.50) et à -50/+50 nT alors qu'il était à -20/+20 nT pour les deux autres sites. Ces amplitudes plus fortes sont attribuées à la présence de fondations en basalte. On observe également que l'enceinte intérieure est loin d'être circulaire ce qui s'observait déjà sur l'image Google Earth (Figure 3.52). Ses dimensions sont d'environ 230 m de côté.

On observe d'autres anomalies magnétiques de forte amplitude à l'intérieur de l'enceinte que l'on attribue également à la présence de basaltes. Enfin, la forte anomalie magnétique

au sud de l'enceinte est due à une pyramide en métal qui a été construite pour servir de point géodésique. Les quelques linéations magnétiques que l'on observe sur la carte d'anomalie en équipopulation (Figure 3.51) pourraient correspondre à des rues radiales et circulaires.

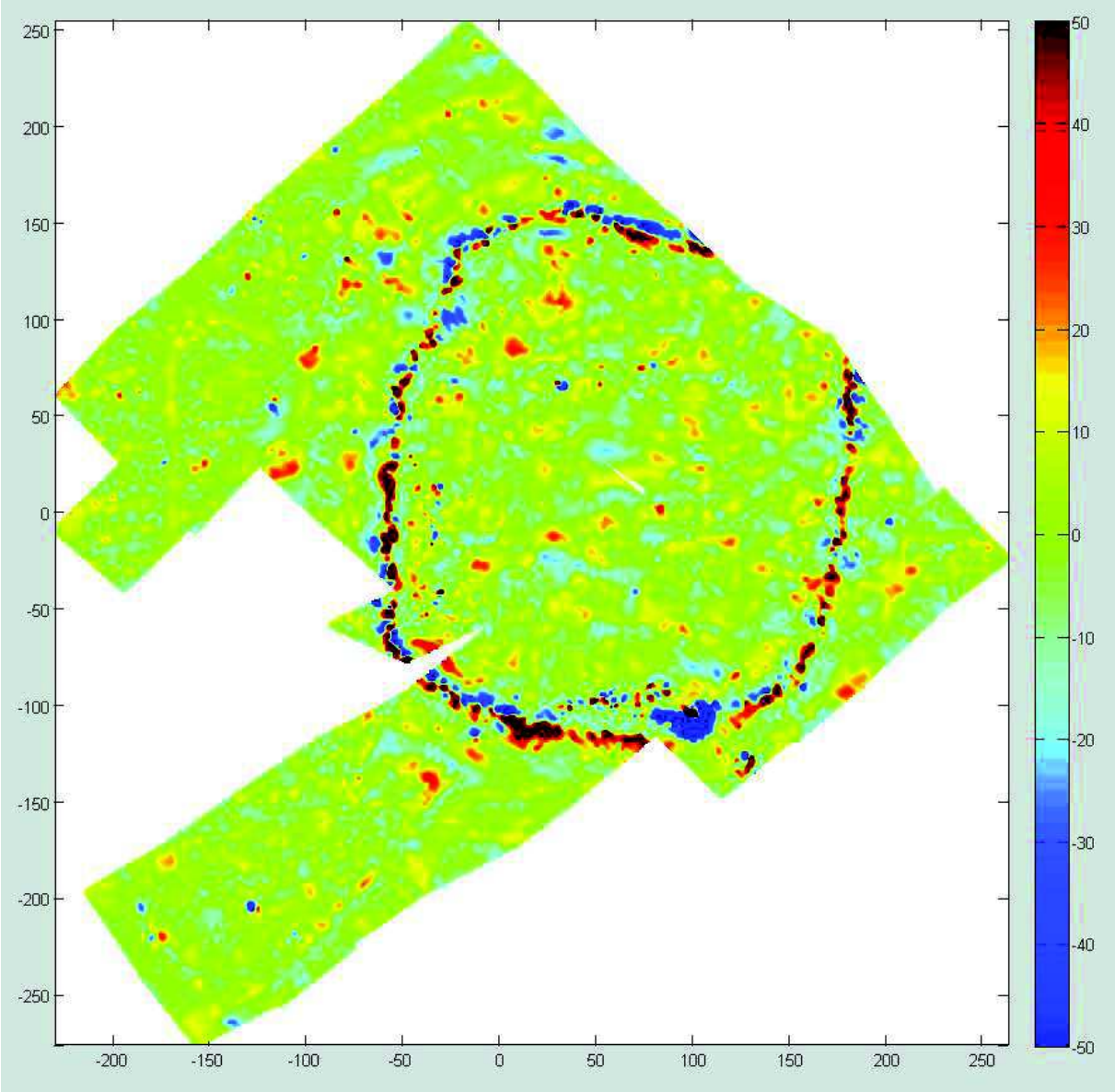


Figure 3.50 ***carte d'anomalie magnétique de Tell Malhat Ed-Deru représentées en échelle linéaire seuillée entre -50 et 50 nT.***

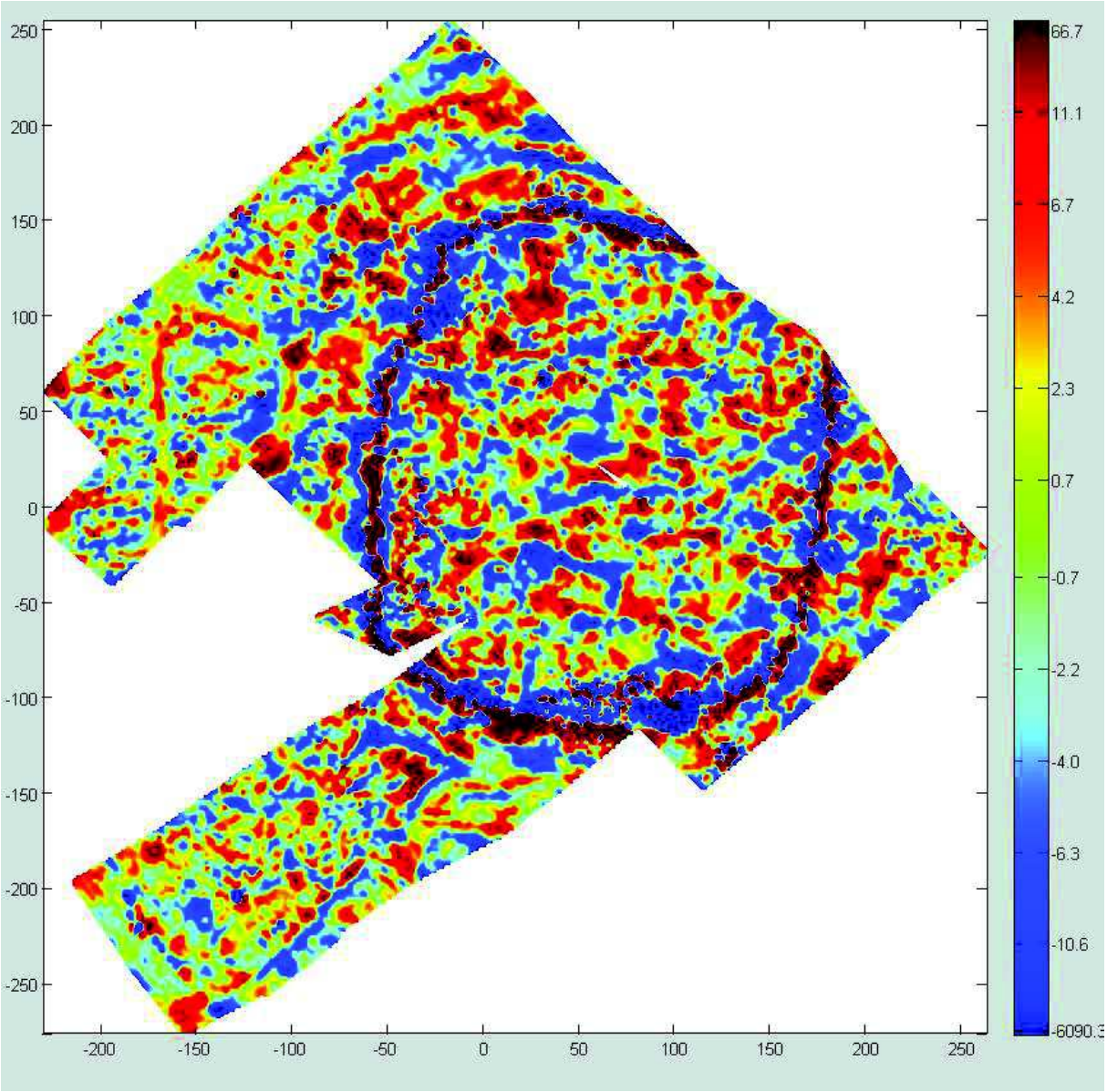


Figure 3.51 ***cartes d'anomalie magnétique de Tell Malhat Ed-Deru représentées en échelle équipopulation.***

Figure 3.52 ***photographie aérienne de Tell Malhat Ed-Deru (source Google Earth).***

11. Conclusion

Pour les trois sites étudiés, les cartes d'anomalies d'Al-Rawda et Sh'airat sont semblables aves des amplitudes du même ordre et des linéations nombreuses. Pour Malhat Ed-Deru, les amplitudes sont beaucoup plus fortes à cause de la présence de basalte (Figure 3.53 et 3.54) et les linéations magnétiques moins nombreuses et moins organisées (Figure 3.55).

Les cartes magnétiques sont perturbées différemment par des objets métalliques en surface, au sud du tell pour Al-Rawda, à l'est de la ville haute pour Sh'airat et dans la ville haute pour Malhat Ed-Deru.

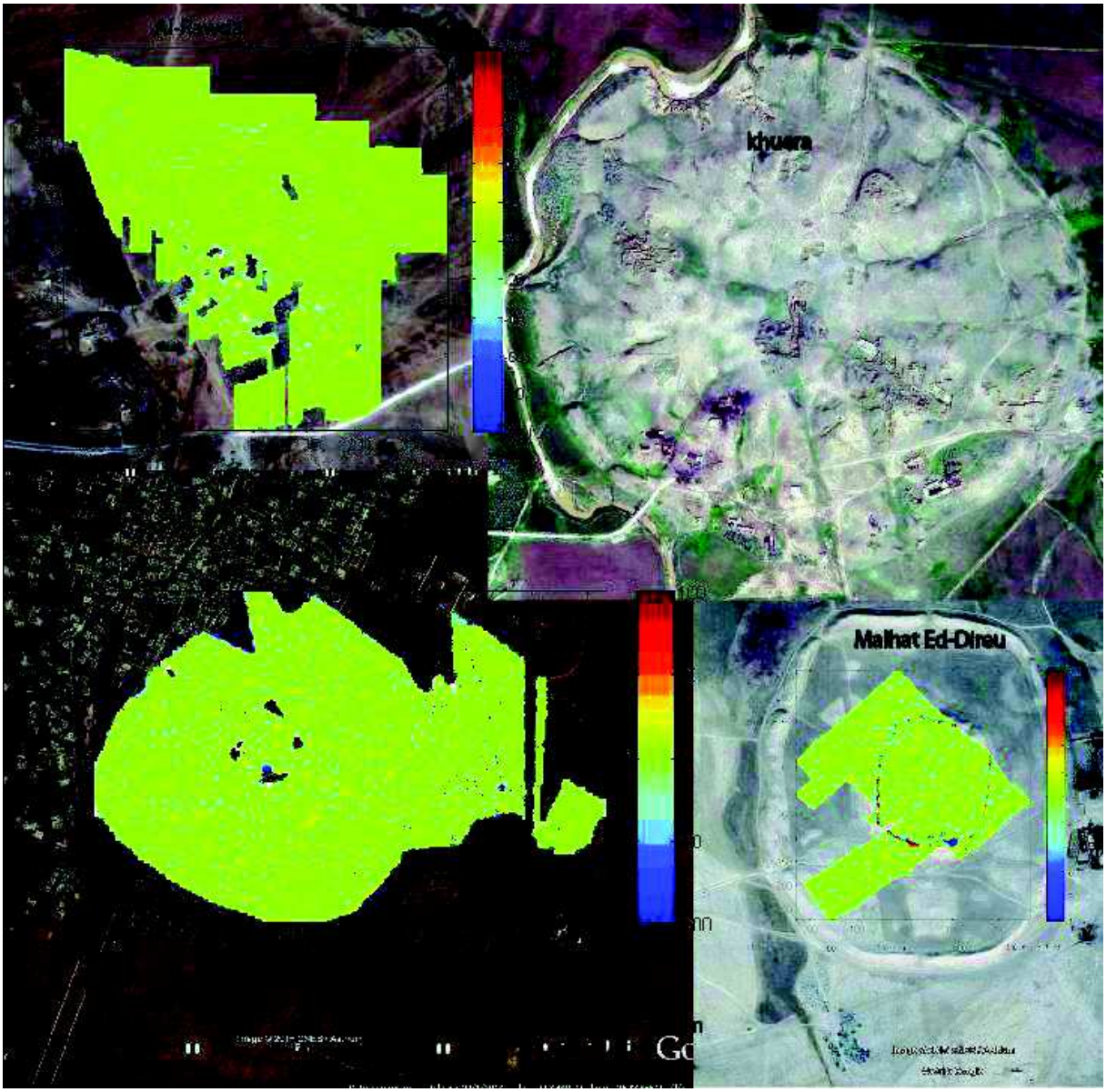


Figure 3.53 ***cartes d'anomalie magnétique des sites d'Al-Rawda, Sh'airat et Malhat Ed-Deru représentées en échelle normale seuillée entre -100 et 100 nT sur fond d'image Google Earth.***

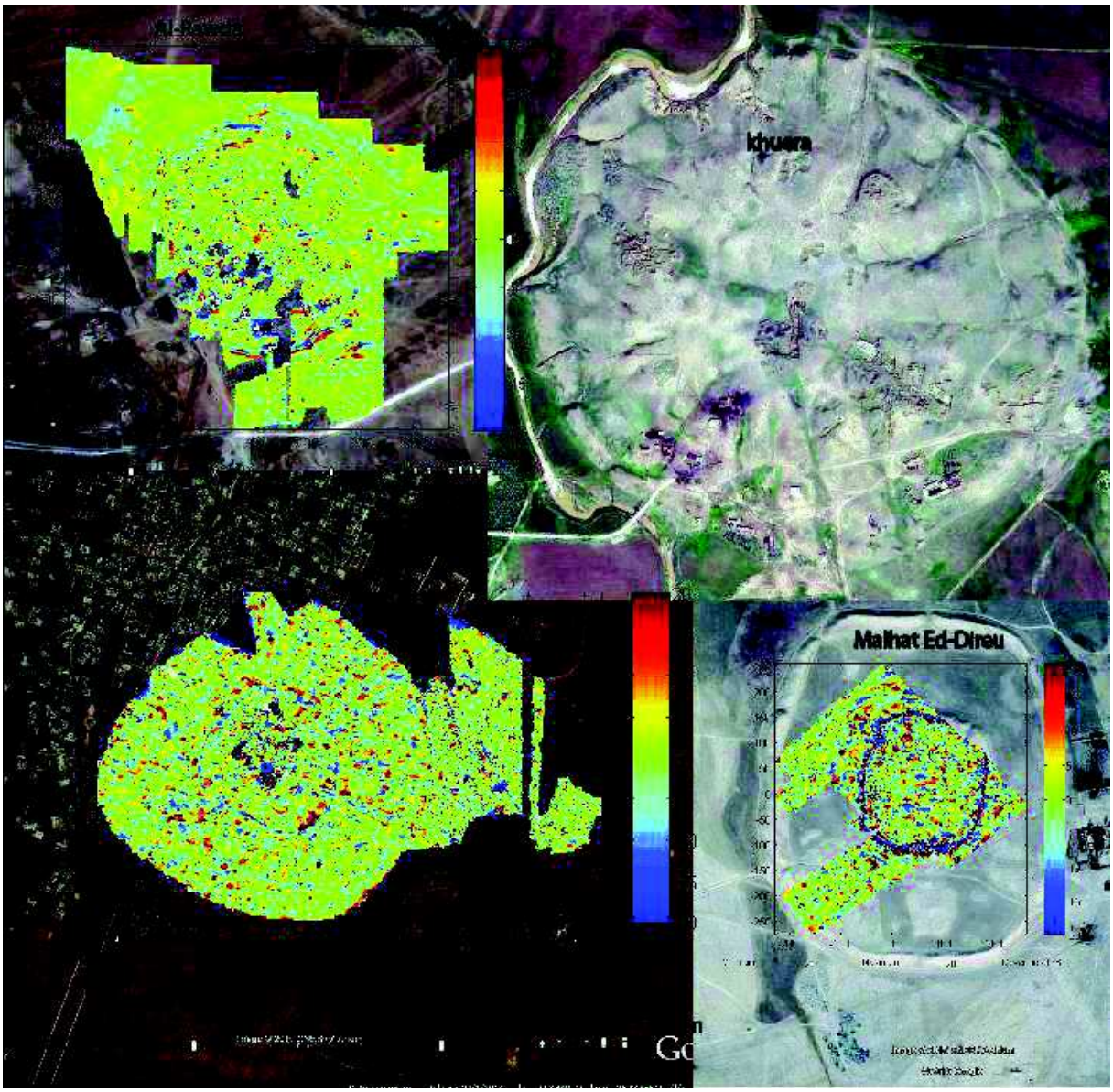


Figure 3.54 ***cartes d'anomalie magnétique des sites d'Al-Rawda, Sh'airat et Malhat Ed-Deru représentées en échelle normale seuillée entre -20 et 20 nT sur fond d'image Google Earth.***

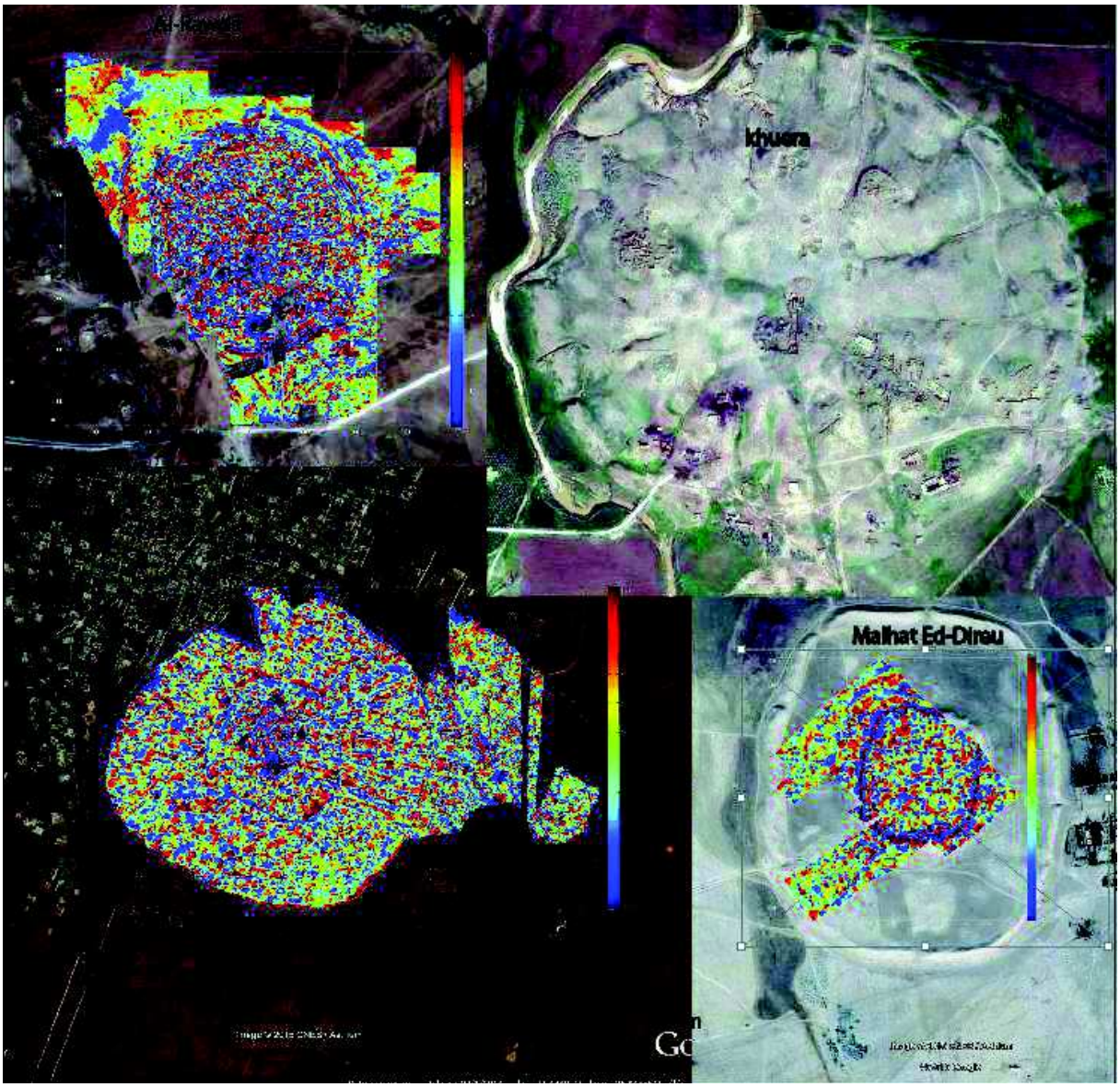


Figure 3.55 ***cartes d'anomalie magnétique des sites d'Al-Rawda, Sh'airat, et Malhat Ed-Deru représentées en échelle équipopulation sur fond d'image Google Earth.***

Chapitre 4 : théorie et cas synthétiques pour l'interprétation

Chapitre 4 : théorie et cas synthétiques pour l'interprétation 155

Chapitre 4 : théorie et cas synthétiques pour l'interprétation 156

1. L'anomalie de l'intensité du champ magnétique 156

1.1. Rappels théoriques..... 156

1.2. La modélisation de cartes magnétiques 158

2. La modélisation 161

2.1. Le modèle de barre infinie 161

2.2. Forme de l'anomalie magnétique de la barre infinie en relation avec la profondeur 164

2.3. Relation et ambiguïté avec un plaque de largeur infinie 170

3. Les opérateurs de transformation de carte 173

3.1. L'opérateur de réduction au pôle 173

3.2. L'opérateur de dérivation 179

3.3. L'opérateur de prolongement..... 188

3.4. Le signal analytique 194

3.5. La transformée tilt-angle..... 201

4. Conclusion 205

Chapitre 4 : théorie et cas synthétiques pour l'interprétation

L'objet de ce chapitre est d'utiliser la théorie du potentiel et les méthodes utiles pour interpréter les cartes magnétiques obtenues au chapitre précédent. Couramment, en cartographie magnétique appliquée à l'archéologie, le travail des géophysiciens consiste à faire une carte puis à la décrire qualitativement avec l'aide des archéologues. L'idéal serait de transformer la carte mathématiquement de manière à trouver la répartition en trois dimensions des sources aimantées du sous-sol. Cette démarche, l'interprétation quantitative, pose de nombreux problèmes et se heurte en particulier au problème inhérent aux méthodes potentielles de l'indétermination des sources, c'est-à-dire à la possibilité que des sources aimantées différentes expliquent la carte magnétique. Après avoir fait quelques rappels théoriques importants pour l'interprétation des cartes, je m'intéresse dans ce chapitre à deux démarches d'interprétation. La modélisation et l'inversion de profils magnétiques puis aux opérateurs de transformation de cartes en méthodes potentielles. Les calculs sont illustrés par des cas synthétiques et l'application à l'interprétation des cartes des trois sites fait l'objet du chapitre suivant.

12. L'anomalie de l'intensité du champ magnétique

12.1. Rappels théoriques

En géophysique, on ne sait pas mesurer le vecteur champ magnétique et, le plus souvent on ne mesure que sa norme. A l'EOST, l'utilisation de capteurs à trois composantes qui mesurent le champ magnétique vectoriel, ne permet pas de résoudre ce problème car on ne sait pas obtenir avec précision l'orientation du capteur dans un référentiel terrestre. Si on considère un champ magnétique vertical de 50000 nT et qu'on change sa direction de 1°, on fait apparaitre une composante horizontale de 872,6 nT et la composante verticale diminue à 49992,4 nT. À l'inverse, si on veut que la composante horizontale soit inférieure à 1 nT, il faut que la direction ne change pas de plus de 0,001146°, soit 4 secondes d'arc. Une centrale d'attitude donnant une telle précision pour l'orientation dans l'espace n'existe pas.

Donc, la mesure magnétique correspond à la mesure de l'intensité du champ magnétique, c'est-à-dire à la norme du vecteur. On suppose connue la direction du champ magnétique terrestre et on considère que l'anomalie magnétique est petite en intensité comparé au champ magnétique de la Terre, qui est appelé le champ magnétique régional.

Par définition, le champ d'anomalie magnétique $\vec{B}$ est défini comme la différence entre le vecteur champ magnétique terrestre mesuré $\vec{M}$ et le vecteur champ de référence $\vec{R}$ calculé

d'après un des modèles globaux (Blakely 1996) et l'anomalie magnétique correspond à la différence entre la mesure de l'intensité du champ magnétique terrestre et l'intensité du champ magnétique régional. Il s'agit donc d'une différence scalaire avec une unité qui est le nanotesla (nT).

Soit $\overrightarrow{M}$ le champ magnétique au point mesure. On mesure $\|\vec{M}\|$ et on connaît le champ magnétique régional $\vec{R}$ à partir du modèle global couramment utilisé, l'International Géomagnétique Reference Field (IGRF). L'anomalie de l'intensité du champ magnétique est définie par

$$F = \|\vec{M}\| - \|\vec{R}\| \tag{6}$$

Pour obtenir l'anomalie magnétique la seule solution possible est

$$\vec{B} = \vec{M} - \vec{R} \tag{7}$$

et pour confronter des données et des équations il faut pouvoir établir une relation entre $\vec{B}$ et F.

$$F = \|\vec{M}\| - \|\vec{R}\| = \|\vec{R} + \vec{B}\| - \|\vec{R}\| \tag{8}$$

Si on suppose que l'anomalie magnétique est petite en intensité par rapport au champ magnétique régional, alors on peut faire un développement limité

$$\|\vec{R} + \overrightarrow{B}\| = \sqrt{\vec{R}.\vec{R} + 2\vec{B}.\vec{R} + \vec{B}.\vec{B}} \approx \sqrt{\vec{R}.\vec{R}} + \frac{\vec{B}.\vec{R}}{\sqrt{\vec{R}.\vec{R}}} \tag{9}$$

d'ou

$$F \approx \frac{\vec{B}.\vec{R}}{\sqrt{\vec{R}.\vec{R}}} = \|\vec{B}\| \, cos(\vec{B}, \vec{R}) \tag{10}$$

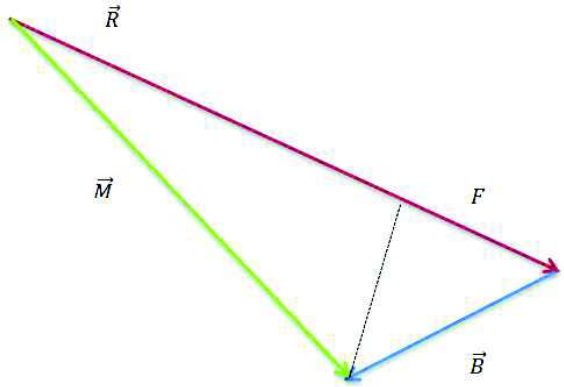


Figure 4.1 ***représentation de l'anomalie magnétique $\vec{B}$ et de l'anomalie de l'intensité du champ magnétique$F$.***

Cela veut dire que l'anomalie de l'intensité du champ magnétique F est la projection du champ d'anomalie $\vec{B}$ sur le vecteur champ magnétique régional $\vec{R}$ (Figure 4.1). Par rapport au potentiel du champ d'anomalie, l'anomalie qui nous intéresse est donc la dérivée du potentiel dans la direction du champ magnétique régional. Par intégration et dérivation, on peut donc obtenir le champ d'anomalie à partir de l'anomalie de l'intensité du champ magnétique.

12.2. La modélisation de cartes magnétiques

On a vu déjà que la méthode de levés magnétiques mesure l'intensité du champ magnétique terrestre. Les mesures incluent les contributions depuis le noyau de la terre et du manteau ainsi que celles causées par la présence de corps aimantés, qui, localement, peuvent causer des anomalies de polarités diverses. L'obtention de ces anomalies est l'objectif des levés magnétiques.

Pour une sphère centrée en $P = P(x', y', z')$ de rayon a ayant une aimantation constante$\vec{j}$, les équations du potentiel et du champ magnétique sont

$$U(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{4\pi a^3}{3}\frac{\vec{j}.\hat{r}}{r^2} \qquad (11)$$

Et

$$\vec{B}(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{4\pi a^3}{3}\frac{j}{r^3}[3(\hat{j}.\hat{r})\hat{r} - \hat{j}] = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{4\pi a^3}{3}\frac{1}{r^5}[3(\vec{j}.\vec{r})\vec{r} - \vec{j}r^2] \qquad (12)$$

avec$\vec{r} = \overrightarrow{PQ}$, $r = \|\vec{r}\| = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}$ et $\hat{r} = \frac{\vec{r}}{r}$. Les notations sont les mêmes pour le vecteur $\vec{j}$ en A/m qui doit être multiplié par le volume en m^3 et par $\mu_0/4\pi$.

Ayant défini l'anomalie de l'intensité du champ magnétique par la projection de $\vec{B}$ sur le champ magnétique régional$\vec{R}$, on a

$$F(x,y,z) = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{4\pi a^3}{3}\frac{j}{r^3}[3(\hat{j}.\hat{r})\hat{r} - \hat{j}].\hat{R} \qquad (13)$$

Dans le cas suivant, un cas synthétique a été construit afin de mieux voir la forme des anomalies magnétiques (Figure 4.2). La source de l'anomalie est une surface rectangulaire de 3 m de longueur et 2 m de largeur à une profondeur de 2 m. Plutôt que d'établir l'équation de l'anomalie magnétique d'une telle forme, on préfère utiliser l'équation du champ du dipôle et faire une sommation selon la surface occupée par le rectangle. Aussi, on choisit un ensemble de dipôles à 2 m de profondeur et espacés de 0,05 m sur la surface du rectangle. La déclinaison et l'inclinaison choisies pour ce cas synthétique sont respectivement de 4° et 52° qui correspondent à la déclinaison et l'inclinaison moyennes des sites syriens. On considère par ailleurs que l'aimantation est induite, c'est-à-dire que sa direction est celle du champ magnétique régional.

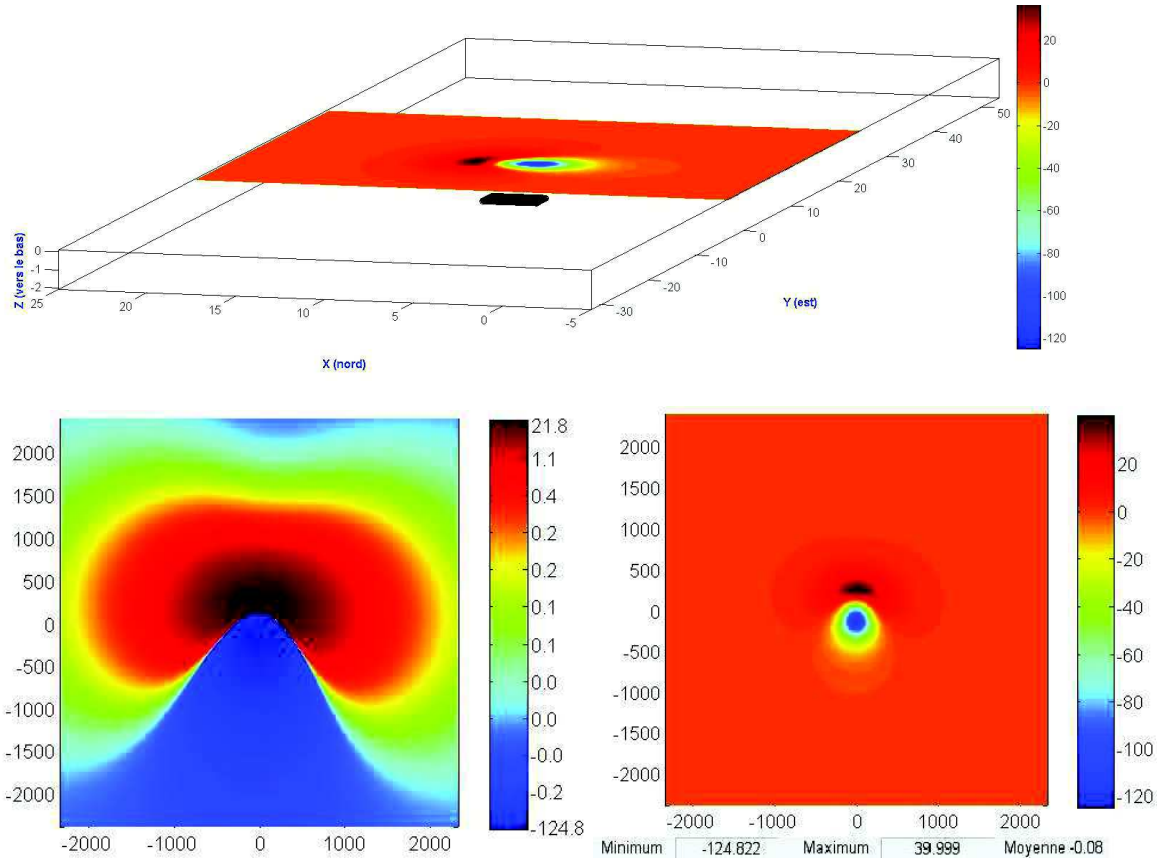


Figure 4.2 ***cartes de l'intensité du champ magnétique pour un cas synthétique (structure rectangulaire 2 m de largeur, 3 m de longueur et 2 m de profondeur). En bas, à gauche l'anomalie est représentée en équipopulation et en bas à droite en échelle normale.***

La carte ci-dessus montre que l'anomalie magnétique consiste de deux parties, une partie positive et une partie négative et la structure se trouve entre les deux parties.

L'utilisation de dipôles permet de calculer l'anomalie magnétique de structures beaucoup plus complexes. Par exemple, on a construit un autre cas synthétique basé sur la fouille du secteur 6 effectuée sur le site d'Al-Rawda. Les dipôles sont placés à une profondeur de 2 m.

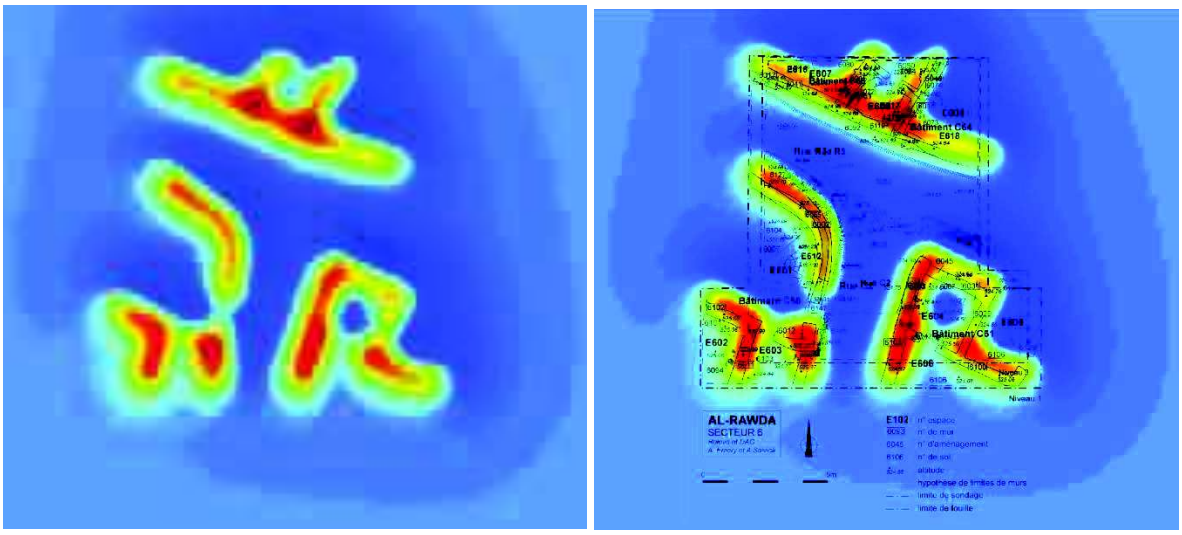


Figure 4.3 ***carte d'anomalie de l'intensité du champ magnétique calculée pour une répartition de dipoles à 2 m de profondeur et répartis selon le plan de la fouille effectuée dans le secteur 6 (site Al-Rawda).***

13. La modélisation

Généralement, faire un modèle en trois dimensions est assez difficile, car pour définir le modèle, il faut donner les trois coordonnées des points qui limitent les structures et, dans un deuxième temps, changer ces points de manière à ajuster au mieux possible le modèle magnétique avec les données. C'est pourquoi, surtout si les anomalies magnétiques montrent un allongement important, on pratique la modélisation à deux dimensions. Mathématiquement, cela veut dire que rien ne varie dans une direction horizontale et on peut alors faire des calculs avec des fonctions à deux variables.

13.1. Le modèle de barre infinie

Les équations les plus utilisées ont été établies par Talwani et Heirtzler (1964) et cette méthode d'interprétation à deux dimensions est couramment utilisée. L'idée a été d'obtenir l'anomalie magnétique d'une structure à deux dimensions de section polygonale quelconque. La même méthode a été proposée en gravimétrie (Talwani et al., 1959). Dans la partie qui suit sont repris des éléments de l'article de Talwani et Heirtzler (1964), mais on se limite au calcul de l'anomalie magnétique d'une barre de section élémentaire ce qui permet d'étudier l'anomalie magnétique sous la forme d'une fonction d'une seule variable et de caractériser ses principales propriétés.

Si on considère un élément de volume (dx, dy, dz) uniformément aimanté $\vec{j}$= (j_x, j_y, j_z) en un point de coordonnées $\vec{R}$ =(x, y, z) dans un référentiel cartésien (Figure 4.4), le potentiel magnétique scalaire à l'origine est

$$\Omega = \frac{\vec{m}\vec{R}}{R^3} \tag{14}$$

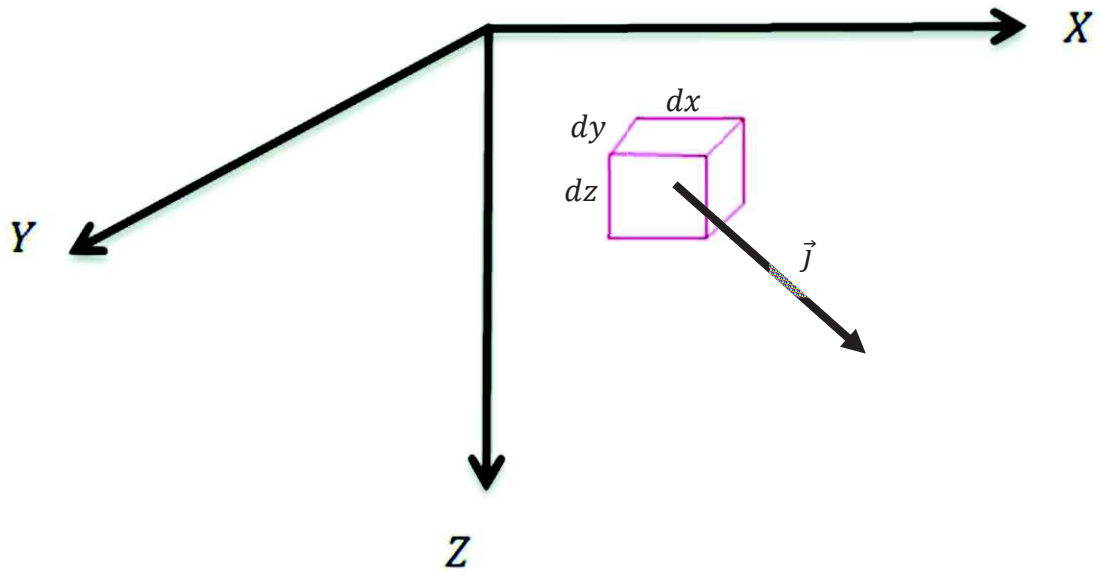


Figure 4.4 ***référentiel utilisé pour la modélisation à deux dimensions.***

Le moment magnétique $\vec{m}$ de l'élément de volume s'écrit

$$\vec{m} = \vec{j}\, dxdydz \tag{15}$$

On a donc pour le potentiel à l'origine

(16)

$$\Omega = \frac{j_x x + j_y y + j_z z}{\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)^3}} dxdydz$$

Le calcul du potentiel n'importe où à l'extérieur des sources s'obtient sans difficulté par translation de repère. Il n'est donc pas nécessaire d'alourdir l'équation en donnant l'expression du potentiel à l'extérieur des sources. La première opération proposée par Talwani et Heirtzler (1964) consiste à calculer le potentiel de la barre infinie en intégrant selon l'axe oy

$$\Omega = dx\, dz \int_{-\infty}^{\infty} \frac{j_x x + j_y y + j_z z}{\left(\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2}\right)^3}\, dy \qquad (17)$$

Qui donne

$$\Omega = 2\frac{j_x x + j_z z}{x^2 + z^2} dx\, dz \qquad (18)$$

On remarque que le potentiel ne dépend plus de j_y la composante en y de l'aimantation. Quelques soient les calculs ultérieurs, on obtient donc que si un corps est suffisamment étendu et homogène dans une direction donnée, alors le potentiel magnétique produit et en conséquence le champ ne dépendront pas de la composante de l'aimantation dans la direction de l'allongement. Aussi, si l'aimantation est dans la direction infinie, le corps aimanté ne produit pas de champ magnétique ce qui constitue une indétermination si on veut obtenir l'aimantation à partir du potentiel ou du champ.

On a déjà vu que le champ magnétique est le gradient du potentiel. Il suffit donc de dériver l'expression précédente dans les trois directions : la dérivée dans la direction oy est bien sur nulle et pour les deux autres dérivées, il faudrait prendre en compte l'expression générale du potentiel, pas uniquement à l'origine. Mais comme il s'agit d'une translation de repère, on peut dériver selon les variables x et z à condition de changer le signe du résultat à la fin du calcul. On obtient alors pour la composante verticale du champ magnétique par dérivation selon l'axe oz

$$V = \frac{d\Omega}{dz} = 2dxdz\, \frac{2j_x x\, z - j_z(x^2 - z^2)}{(x^2 + z^2)^2} \qquad (19)$$

Et pour la composante horizontale selon l'axe ox

$$H = \frac{d\Omega}{dx} = 2dxdz\,\frac{j_x(x^2 - z^2) + 2j_z x\,z}{(x^2 + z^2)^2} \qquad (20)$$

13.2. Forme de l'anomalie magnétique de la barre infinie en relation avec la profondeur

Dans le cas suivant on voit comment change la forme de l'anomalie magnétique par rapport à la profondeur. Pour la figure 4.5 on a un structure de 2 m de largeur, 3 m de longueur et à 2 m de profondeur sur la carte à gauche, et à 6 m de la profondeur sur la carte à droite. Les cartes ne peuvent pas avoir la même échelle de couleur (40 - -130 nT à gauche et 10 - -20 nT à droite) en raison de la décroissance rapide du champ magnétique avec l'augmentation de la distance aux sources. L'utilité de la figure est de montrer que la distance entre le maximum et le minimum de l'anomalie est liée à la distance à la source.

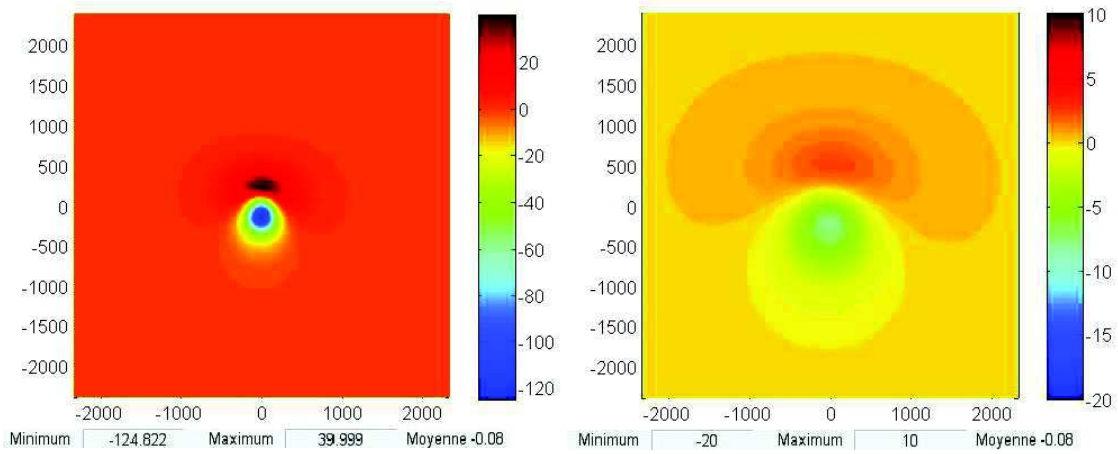


Figure 4.5 ***Carte d'anomalie magnétique pour une structure rectangulaire de 2 m de largeur, 3 m de longueur et 2 m de profondeur (la carte à gauche) et 6m de profondeur (la carte à droite).***

Du point de vue théorique, pour obtenir l'anomalie de l'intensité du champ magnétique de la barre infinie, il faut projeter dans la direction du champ magnétique régional. Soient r_x et r_z les deux composantes du champ magnétique régional unitaire, nous avons donc

$$A = Vr_z + Hr_x = 2dxdz\left[\frac{2j_x x\,z - j_z(x^2 - z^2)}{(x^2 + z^2)^2}r_z + \frac{j_x(x^2 - z^2) + 2j_z x\,z}{(x^2 + z^2)^2}r_x\right] \qquad (21)$$

A ce stade, il faut venir à l'anomalie de l'intensité du champ magnétique partout en dehors des structures, c'est-à-dire à une fonction à deux dimensions dépendant des caractéristiques de la barre infinie. Par translation de repère et en plaçant la barre infinie à l'origine, ce qui ne limite pas la généralité de l'équation, on obtient

$$A(x,z) = \frac{x^2(r_x j_x - r_z j_z) + 2xz(r_x j_z + r_z j_x) - z^2(r_x j_x - r_z j_z)}{(x^2+z^2)^2} \quad (22)$$

On a aussi omis le terme $2dxdz$ qui est un terme multiplicateur ne modifiant que l'amplitude de la fonction. Les trois termes entre parenthèse du numérateur ne sont pas indépendants. Il est facile de montrer que quels que soit l'aimantation et le champ magnétique régional, on peut les écrire sous forme trigonométrique. En se plaçant dans le repère géographique de la figure 4.6, l'axe horizontal des x ayant une direction α nous avons$r = (r_x, r_z) = (\cos i \cos(\alpha - d), \sin i) = Re^{I_R}$. I_R est ce que l'on appelle l'inclinaison apparente, c'est-à-dire la projection du vecteur dans le plan (x,z). Le même changement de variables est fait pour l'aimantation est nous avons $j = (j_x, j_z) = j(\cos I cos(\alpha - D), \sin I) = Me^{I_M}$ l'aimantation.

$$r_x m_x - r_z m_z = R\cos I_R M \cos I_M - R \sin I_R M \sin I_M = RMcos(I_R + I_M) = RMcos(I_T)$$

$$r_x m_z + r_z m_x = R\cos I_R M \sin I_M + R \sin I_R M \cos I_M = RMsin(I_R + I_M) = RMsin(I_T)$$

$$A(x,z) = RM\frac{x^2 cosI_T + 2xzsinI_T - z^2 cosI_T}{(x^2+z^2)^2} \quad (23)$$

$A(x,z)$ Constitue la fonction de la variable x que nous voulons étudier, en particulier chercher ses extréma.

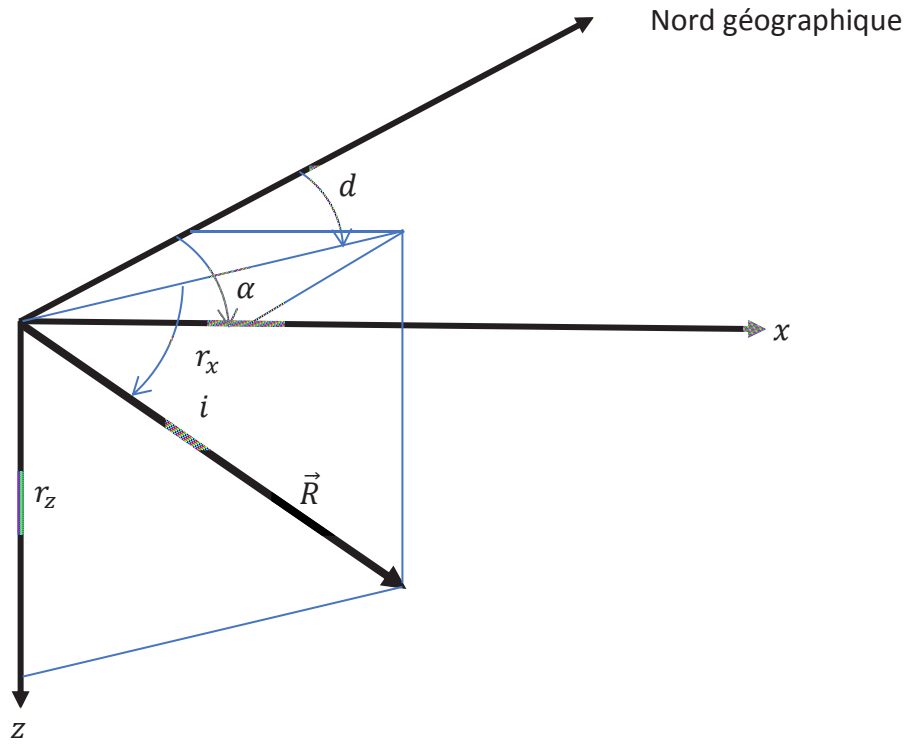


Figure 4.6 ***repère pour le calcul de l'anomalie de l'intensité du champ magnétique. La même définition est appliquée pour le vecteur aimantation.***

Le numérateur de la fonction dérivée est

$$f(x) = RM[cosI_T x^3 + 3sinI_T zx^2 - 3cosI_T z^2 x - sinI_T z^3] \quad (24)$$

Il s'agit donc d'un polynôme d'ordre 3 dont nous cherchons les zéros. Le problème n'est pas si simple et nous utilisons McAllister (1997) pour le résoudre ("Algebra - Roots of the Cubic Equation", 2015)

$$f(x) = \frac{RM}{2}\left[\left(e^{iI_T} + e^{-iI_T}\right)x^3 + 3\left(e^{iI_T} - e^{-iI_T}\right)zx^2 - 3R\left(e^{iI_T} + e^{-iI_T}\right)z^2 x - \left(e^{iI_T} - e^{-iI_T}\right)z^3\right] \quad (25)$$

En posant $\frac{f(x)}{RMcosI_T} = x^3 + a_2 x^2 + a_1 x + a_0$, nous avons

$$a_2 = \frac{3sinI_T z}{cosI_T} = 3ztanI_T$$
$$a_1 = \frac{-3cosI_T z^2}{cosI_T} = -3z^2$$
$$a_0 = \frac{-sinI_T z^3}{cosI_T} = -z^3 tanI_T$$

$$q = \frac{1}{3}a_1 - \frac{1}{9}{a_2}^2 = -z^2 - z^2 tan^2 I_T = -z^2(1 + tan^2 I_T)$$
$$r = \frac{1}{6}(a_1 a_2 - 3a_0) - \frac{1}{27}{a_2}^3 = \frac{1}{6}(-9z^3 tanI_T + 3z^3 tanI_T) - \frac{1}{27}27z^3 tan^3 I_T = -z^3 tanI_T(1 + tan^2 I_T)$$

$$q^3 + r^2 = -z^6(1 + tan^2 I_T)^3 + z^6\, tan^2 I_T(1 + tan^2 I_T)^2 = -z^6(1 + tan^2 I_T)^2$$

$$\sqrt{q^3 + r^2} = \pm i z^3(1 + tan^2 I_T)$$

$$s_1 = \left[r + (q^3 + r^2)^{\frac{1}{2}}\right]^{\frac{1}{3}} = [-z^3 tanI_T(1 + tan^2 I_T) + iz^3(1 + tan^2 I_T)]^{\frac{1}{3}}$$
$$= z[(1 + tan^2 I_T)(i - tanI_T)]^{\frac{1}{3}}$$
$$s_1 = \frac{z}{cosI_T}(icosI_T - sinI_T)^{\frac{1}{3}} = \frac{z}{cosI_T} e^{\frac{i}{3}(I_T + \frac{\pi}{2})}$$
$$s_2 = \left[r - (q^3 + r^2)^{\frac{1}{2}}\right]^{\frac{1}{3}} = [-z^3 tanI_T(1 + tan^2 I_T) - iz^3(1 + tan^2 I_T)]^{\frac{1}{3}}$$
$$= z[(1 + tan^2 I_T)(-i - tanI_T)]^{\frac{1}{3}}$$

$$s_2 = \frac{z}{cosI_T}(-icosI_T - sinI_T)^{\frac{1}{3}} = \frac{z}{cosI_T} e^{-\frac{i}{3}(I_T + \frac{\pi}{2})}$$

Et finalement les solutions sont toujours au nombre de trois nombres réels et égales à

$$x_1 = \frac{z}{cosI_T}\left(e^{\frac{i}{3}(I_T + \frac{\pi}{2})} + e^{-\frac{i}{3}(I_T + \frac{\pi}{2})}\right) - ztanI_T$$

$$x_2 = -\frac{z}{2cosI_T}\left(e^{\frac{i}{3}\left(I_T + \frac{\pi}{2}\right)} + e^{-\frac{i}{3}\left(I_T + \frac{\pi}{2}\right)}\right) - ztanI_T + i\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{z}{cosI_T}\left(e^{\frac{i}{3}(I_T + \frac{\pi}{2})} - e^{-\frac{i}{3}(I_T + \frac{\pi}{2})}\right)$$

$$x_3 = -\frac{z}{2cosI_T}\left(e^{\frac{i}{3}\left(I_T+\frac{\pi}{2}\right)} + e^{-\frac{i}{3}\left(I_T+\frac{\pi}{2}\right)}\right) - ztanI_T - i\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{z}{cosI_T}\left(e^{\frac{i}{3}(I_T+\frac{\pi}{2})} - e^{-\frac{i}{3}(I_T+\frac{\pi}{2})}\right)$$

Soit $A = \frac{1}{3}\left(I_T + \frac{\pi}{2}\right)$

$$\begin{cases} x_1 = \frac{z}{cosI_T}2cosA - ztanI_T = z\frac{2cosA - sinI_T}{cosI_T} \\ x_2 = -\frac{z}{2cosI_T}2cosA - ztanI_T + i\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{z}{cosI_T}2isinA = -z\frac{cosA + sinI_T + \sqrt{3}sinA}{cosI_T} \\ x_3 = -\frac{z}{2cosI_T}2cosA - ztanI_T - i\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{z}{cosI_T}2isinA = -z\frac{cosA + sinI_T - \sqrt{3}sinA}{cosI_T} \end{cases}$$

Nous avons $cosA = \frac{\sqrt{3}}{2}cos\frac{I_T}{3} - \frac{1}{2}sin\frac{I_T}{3}$ et $sinA = \frac{1}{2}cos\frac{I_T}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2}sin\frac{I_T}{3}$.

$$\begin{cases} x_1 = z\frac{2cosA - sinI_T}{cosI_T} = \frac{z}{cosI_T}\left(\sqrt{3}cos\frac{I_T}{3} - sin\frac{I_T}{3} - sinI_T\right) \\ x_2 = -z\frac{cosA + sinI_T + \sqrt{3}sinA}{cosI_T} = -\frac{z}{cosI_T}\left(\sqrt{3}cos\frac{I_T}{3} + sin\frac{I_T}{3} - 2sinI_T\right) \\ x_3 = -z\frac{cosA + sinI_T - \sqrt{3}sinA}{cosI_T} = -\frac{z}{cosI_T}\left(2sin\frac{I_T}{3} + 2sinI_T\right) \end{cases}$$

et donc le résultat final est

$$\begin{cases} x_1 = \frac{z}{cosI_T}\left(\sqrt{3}cos\frac{I_T}{3} - sin\frac{I_T}{3} - sinI_T\right) \\ x_2 = -\frac{z}{cosI_T}\left(\sqrt{3}cos\frac{I_T}{3} + sin\frac{I_T}{3} - 2sinI_T\right) \\ x_3 = -\frac{z}{cosI_T}\left(2sin\frac{I_T}{3} + 2sinI_T\right) \end{cases} \quad (26)$$

Nous voyons que contrairement à ce qui est généralement indiqué, l'anomalie magnétique a toujours trois extrema et non deux (Figure 4.7). Pour I_T = 90 ou 270° on a une indétermination qui a pour conséquence qu'une des solutions est à l'infini. Enfin, la distance entre les deux extrema principaux n'est pas constante. Pour étudier cela on calcule les trois distances entre les extrema,

$$\begin{cases} x_1 - x_2 = \dfrac{z}{cosI_T}\left(3cosA + \sqrt{3}sinA\right) = \dfrac{z}{cosI_T}2\sqrt{3}cos\dfrac{I_T}{3} \\ x_1 - x_3 = \dfrac{z}{cosI_T}\left(3cosA - \sqrt{3}sinA\right) = \dfrac{z}{cosI_T}\left(\sqrt{3}cos\dfrac{I_T}{3} - 3sin\dfrac{I_T}{3}\right) \\ x_2 - x_3 = \dfrac{z}{cosI_T}\left(-2\sqrt{3}sinA\right) = \dfrac{z}{cosI_T}\left(-\sqrt{3}cos\dfrac{I_T}{3} - 3sin\dfrac{I_T}{3}\right) \end{cases} \quad (27)$$

On observe que la distance est proportionnelle à z ce qui est un résultat important. La pente varie entre $\frac{2}{\sqrt{3}}$ pour I_T = 45° modulo 180° et $\sqrt{3}$ pour I_T = 90° modulo 180°.

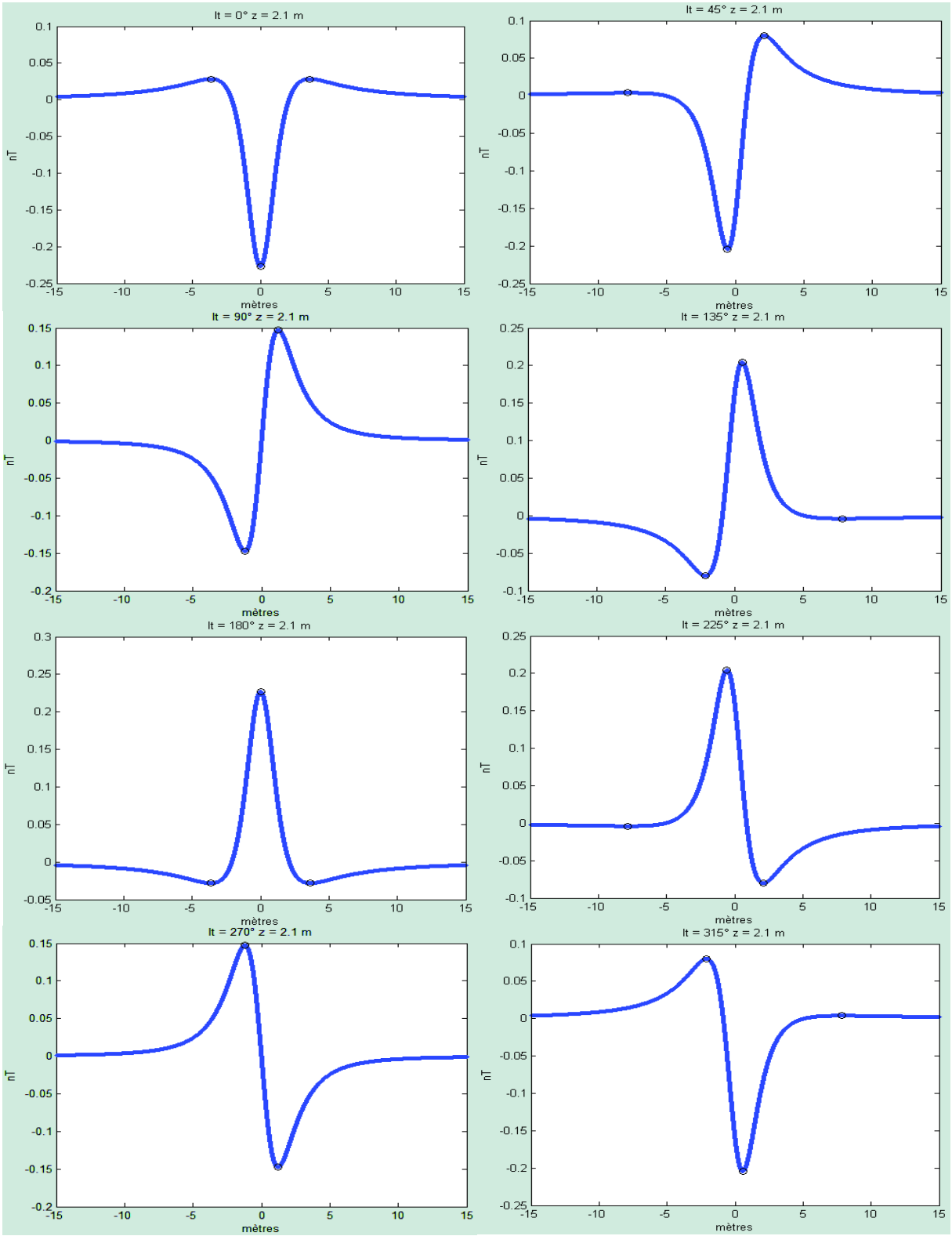


Figure 4.7 ***anomalie de l'intensité du champ magnétique pour une barre infinie à une profondeur de 2,1 m et I_T=0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 et 315°. Les cercles noirs indiquent la position des extrema.***

13.3. Relation et ambiguïté avec un plaque de largeur infinie

Dans le cas des sites syriens, la pente de la relation linéaire entre la distance des extrema et la profondeur est établie en faisant varier la profondeur (Figure 4.8). On obtient une valeur de 1,2

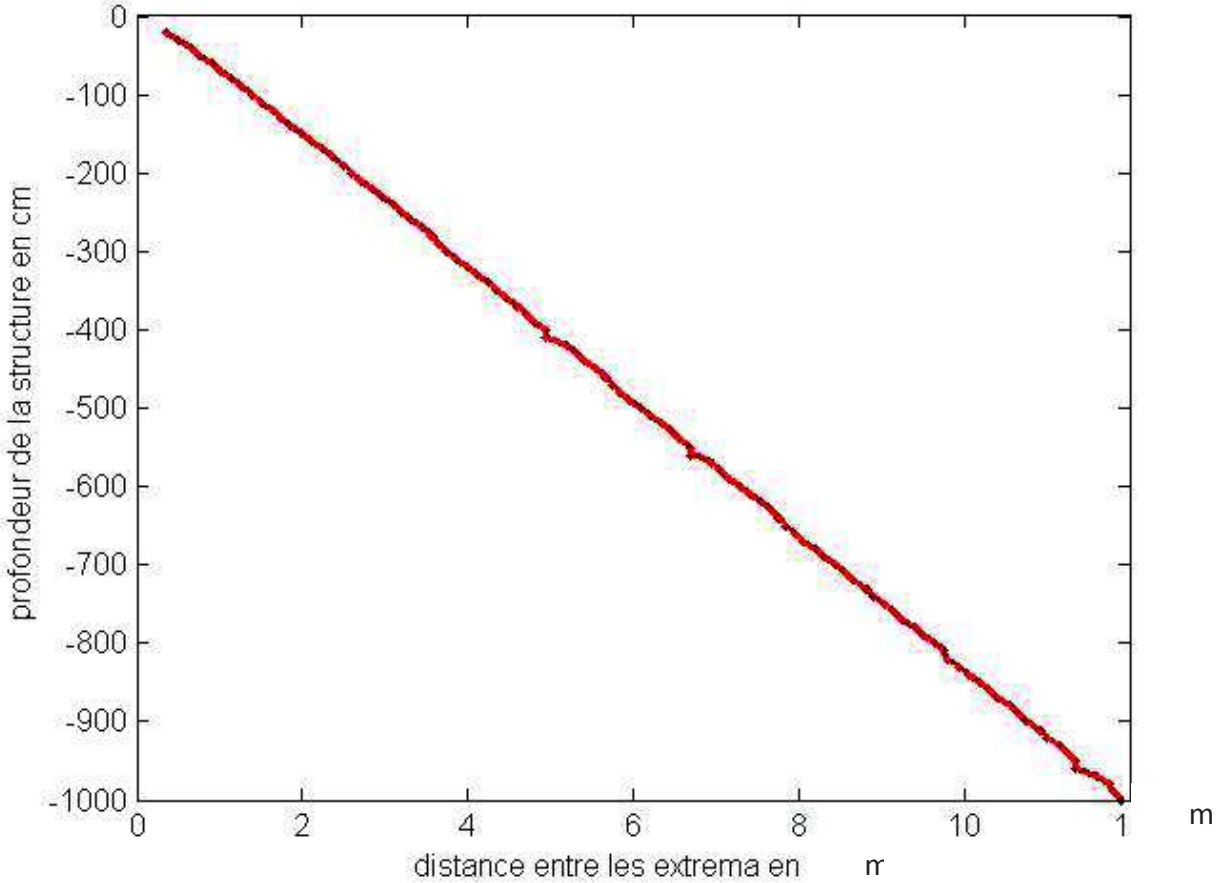


Figure 4.8 ***relation linéaire de la distance horizontale entre le maximum et le minimum de l'anomalie magnétique due à un cylindre horizontal infini en fonction de la profondeur.***

Si on considère une plaque horizontale, plutôt qu'un cylindre, selon la largeur et la profondeur de la plaque la distance entre le minimum et le maximum évolue. En présence d'un profil de données, si on interprète l'anomalie comme étant due à un cylindre, la profondeur obtenue peut être fausse s'il s'agit d'une plaque.

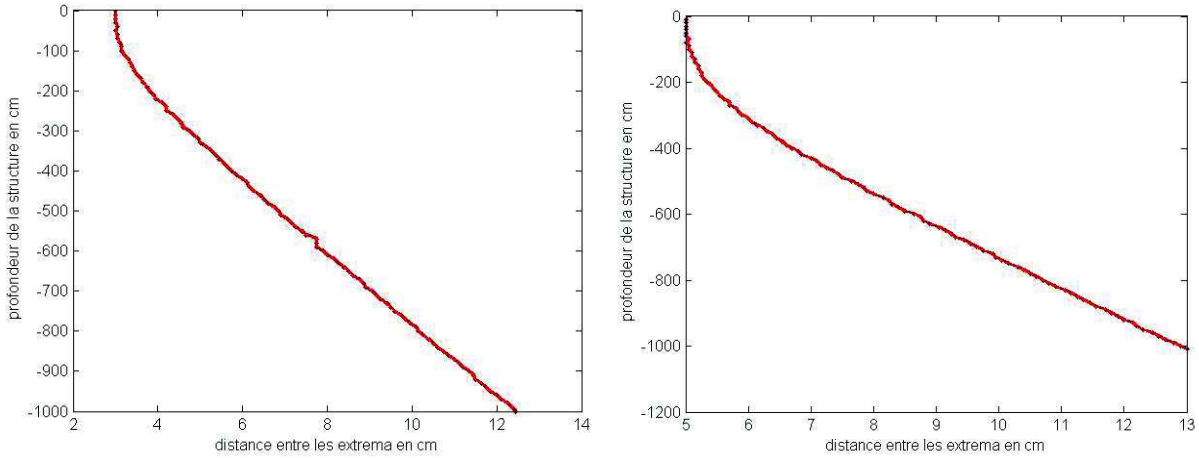


Figure 4.9 ***relation de la distance horizontale entre le maximum et le minimum de l'anomalie magnétique due à une structure de 3 m de largeur à gauche, et de 5 m de largeur à droite en fonction de la largeur.***

Pour la plaque de 3 m de large, on fait varier sa profondeur (Figure 4.9, à gauche). Jusqu'à environ 1 m la distance entre le minimum et le maximum reste constante égale à environ 3 m puis elle augmente linéairement comme s'il s'agissait d'un cylindre. Il y a donc une profondeur critique entre 0 et 1 m. Pour la plaque de 5 m de large (Figure 4.9, à droite), la pente constante apparait à partir d'une profondeur plus faible que précédemment.

Dans un deuxième temps, pour une profondeur constante, on fait varier la largeur de la plaque horizontale pour une profondeur de 3 m (Figure 4.10, à gauche) et une profondeur de 5,5 m (Figure 4.10, à droite). Pour les largeurs les plus faibles, la distance ne varie pas ce qui est normal. Par contre à partir de 2-3 m on observe une pente similaire à celle de l'approfondissement de la barre infinie. Il a donc une difficulté de détermination de la profondeur d'un objet si on ne connait pas sa géométrie.

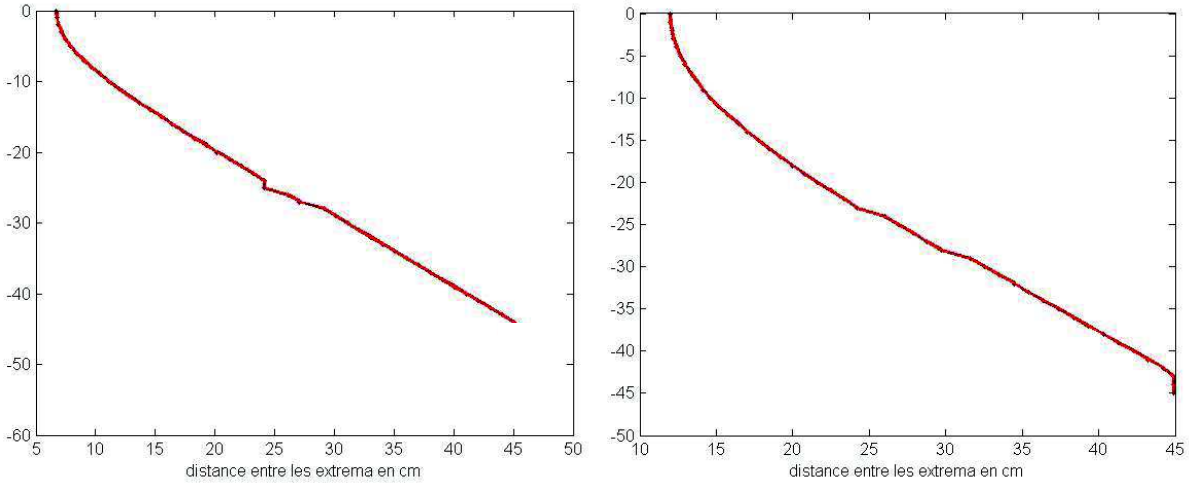


Figure 4.10 ***relation de la distance horizontale entre le maximum et le minimum de l'anomalie magnétique due à une structure à 5.5 m de profondeur à gauche et une structure à 10 m de profondeur à droite en fonction de la largeur.***

14. Les opérateurs de transformation de carte

Lorsqu'on dispose d'une carte magnétique, les propriétés des méthodes potentielles permettent de faire des transformations sans à priori sur la répartition des aimantations dans le sous-sol.

Les cartes magnétiques peuvent être difficiles à interpréter lorsque les levés sont situés loin des pôles magnétiques car les anomalies sont dissymétriques. Pour corriger cela, on utilise une procédure appelée « réduction au pôle ».

Un autre traitement de données consiste à accentuer les limites des anomalies ou de différencier les profondeurs relatives d'où elles proviennent. Il s'agit de l'opérateur de gradient vertical. L'opérateur de prolongement a un effet assez similaire même si sa signification physique est différente.

L'autre opérateur couramment utilisé en magnétisme est le signal analytique. Son avantage est de placer le maximum du signal à l'aplomb des structures. De ce fait, on identifie plus facilement la localisation des objets ainsi que leur géométrie.

Un opérateur a été proposé plus récemment, le tilt-angle. Il est utile pour définir des profondeurs, mais son principal intérêt est d'égaliser l'amplitude des anomalies magnétiques.

14.1. L'opérateur de réduction au pôle

Pour un dipôle en aimantation induite, il y a deux lieux sur la terre pour lesquels le maximum ou le minimum d'une anomalie est à l'aplomb de l'objet. La réduction au pôle est un cas particulier de transformation des données. On a vu précédemment que l'anomalie de l'intensité du champ magnétique mesurée sur carte ou sur profil est la projection du champ d'anomalie dans la direction du champ magnétique régional. Hors le champ d'anomalie est le gradient du potentiel. On peut donc, à partir des données, remonter au potentiel magnétique et, ensuite calculer, ce que seraient les données pour une autre direction du champ magnétique régional (Baranov et Naudy, 1964; Baranov, 1957; Baranov, 1975; Shuey, 1972, Arkani-Hamed, 1988, Arkani-Hamed ,2007, Munschy et Fleury, 2011).

Vu la forme de l'équation du champ magnétique d'un dipôle (équation 7), la considération est exactement la même pour l'aimantation. On peut donc, connaissant les directions du champ magnétique régional et de l'aimantation, recalculer les données pour n'importe quelle autre direction. Pour faire ce calcul d'intégration et de dérivation d'ordre un ou d'ordre deux, il est plus facile de faire les calculs en domaine spectral. L'équation de la transformation pour une carte c'est-à-dire pour une fonction à deux dimensions est

$$H_{rp} = \frac{i\sqrt{u^2+v^2}}{lu+mv+in\sqrt{u^2+v^2}} \frac{i\sqrt{u^2+v^2}}{l'u+m'v+in'\sqrt{u^2+v^2}} \quad (28)$$

(l, m, n) les cosinus directeurs de la direction du champ magnétique terrestre,

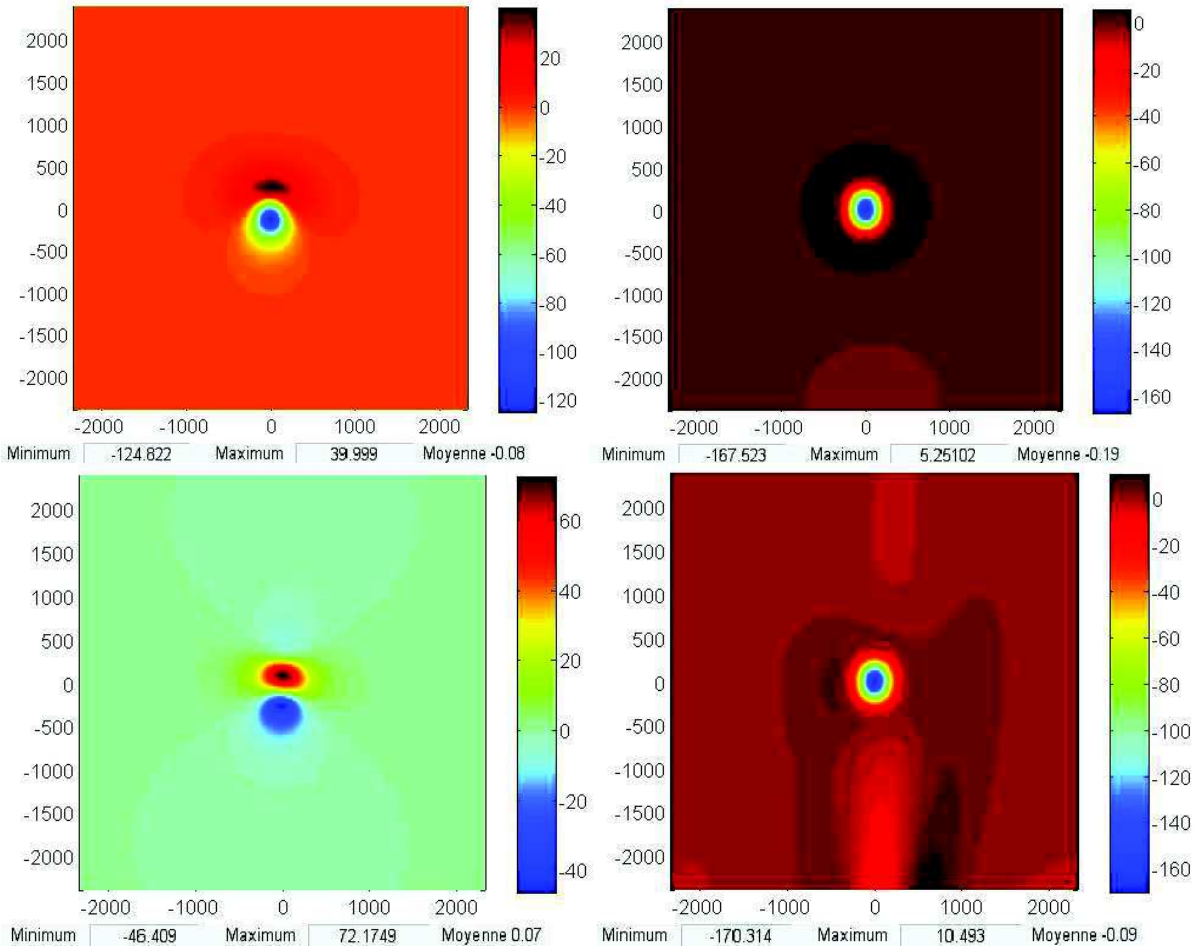
(l', m', n') les cosinus directeurs de l'aimantation,

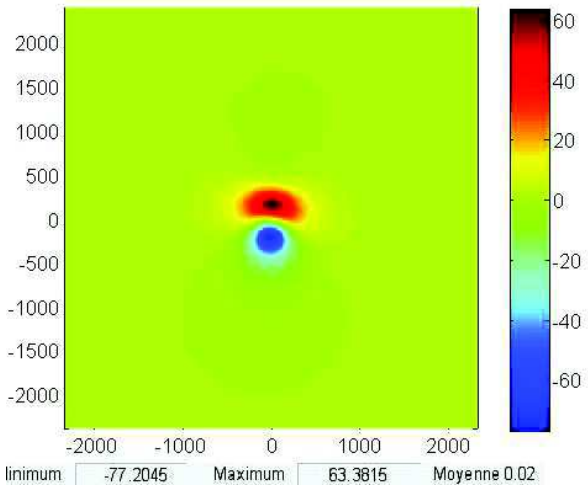
(u, v) les pulsations liées aux axes horizontaux.

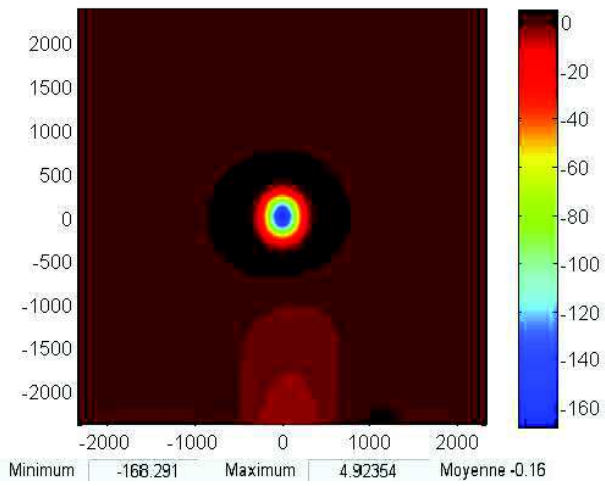
Le numérateur correspond à la dérivation dans la direction verticale $(0.u + 0.v + 1.i.\sqrt{u^2+v^2})$.

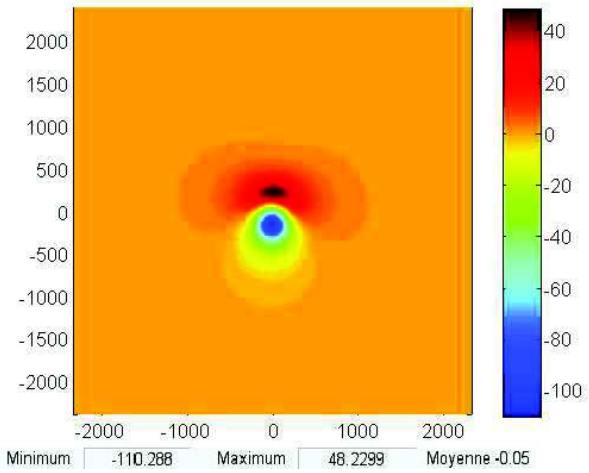
Il est bien évident que si on utilise un seul des deux termes de l'opérateur, on fait ce que l'on appelle une simple réduction au pôle, à savoir que l'on rend un seul des deux vecteurs vertical.

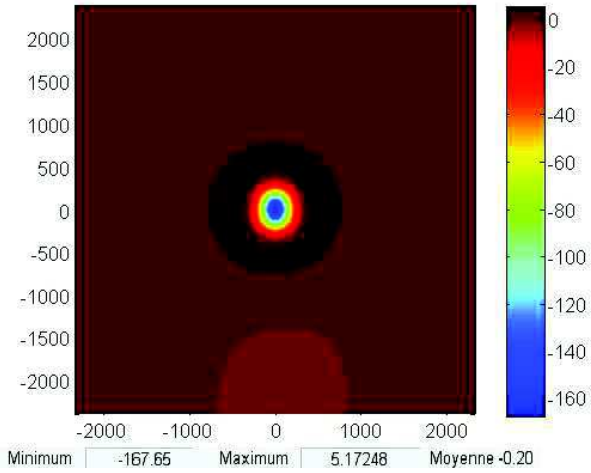
On a calculé la double réduction au pôle dans un cas synthétique pour plusieurs inclinaisons et pour lesquelles on a proposé que l'aimantation soit induite (Figure 4.11). On remarque que l'opérateur de la double réduction au pôle rend l'anomalie symétrique par rapport à la structure et, quel que soit le cas, on obtient les mêmes résultats.

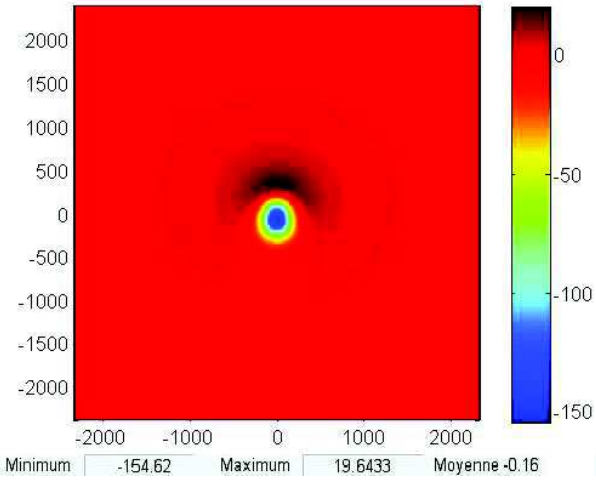


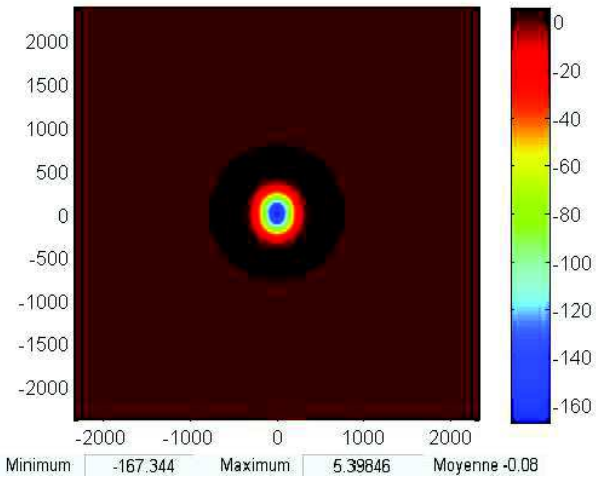

linimum -77.2045 Maximum 63.3815 Moyenne 0.02


Minimum -168.291 Maximum 4.92354 Moyenne -0.16


Minimum -110.288 Maximum 48.2299 Moyenne -0.05


Minimum -167.65 Maximum 5.17248 Moyenne -0.20


Minimum -154.62 Maximum 19.6433 Moyenne -0.16


Minimum -167.344 Maximum 5.39846 Moyenne -0.08

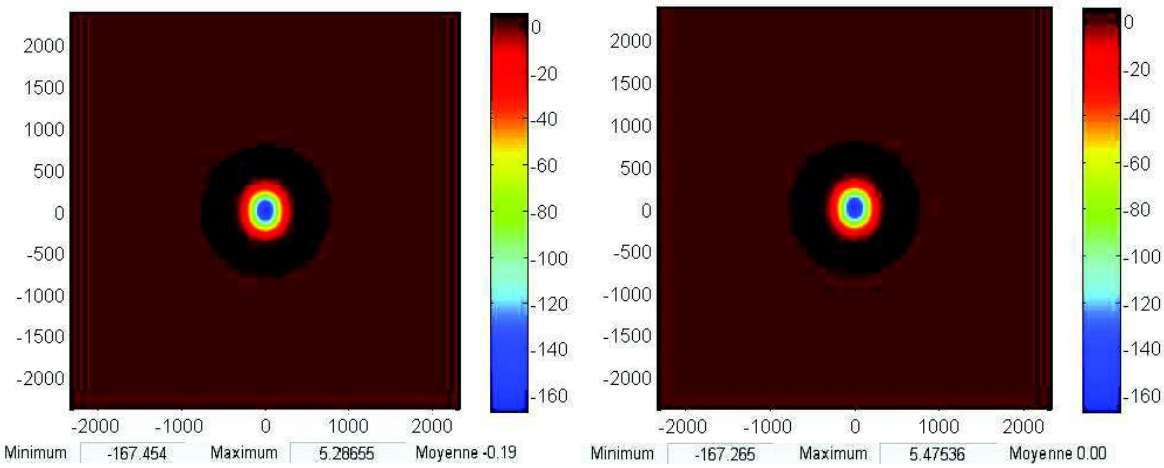


Figure 4.11 ***carte d'anomalie magnétique pour une structure rectangulaire de 2 m de largeur, 3 m de longueur et 2 m de profondeur à aimantation et champ magnétique régional d'inclinaison 52, 15,30 45,70, 90 à gauche et double réduction au pôle à droite.***

On calcule aussi la double réduction au pôle pour une structure à 15° d'inclinaison pour l'aimantation rémanente et avec un champ magnétique régional d'inclinaison à 52°. Si on fait la double réduction au pôle, supposant que l'aimantation est induite, on obtient la carte de la figure 4.12. On observe que la carte réduite au pôle reste très asymétrique, ce qui conduit à supposer que l'aimantation est rémanente et de direction différente de celle du champ magnétique régional. Il faut cependant noter, que l'on pourrait trouver une répartition d'aimantations induites dans le sous-sol qui pourrait expliquer la carte de la figure 4.12 (à droite). C'est donc ainsi, à condition d'avoir une idée à priori sur la géométrie dans le sous-sol, que l'on peut s'interroger sur la présence d'une aimantation rémanente.

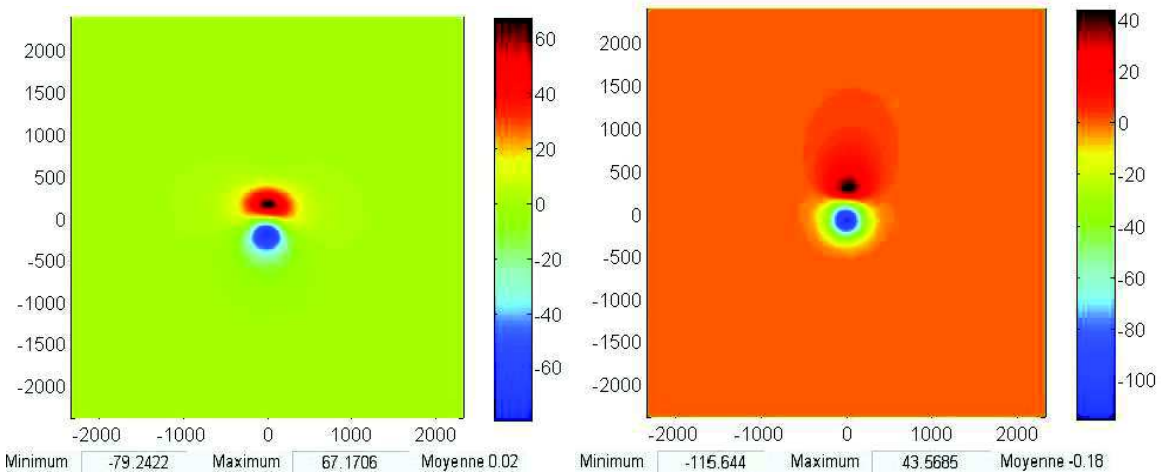


Figure 4.12 ***carte d'anomalie magnétique d'une structure rectangulaire de 2 m de largeur, 3 m de longueur et 2 m de profondeur pour un champ magnétique régional de 52° d'inclinaison à gauche et double réduction au pôle à droite.***

Bien sûr, si on suppose connue la direction de l'aimantation rémanente, 15° dans notre cas, on obtient la forme voulue pour la double réduction au pôle comme le montre la figure 4.13.

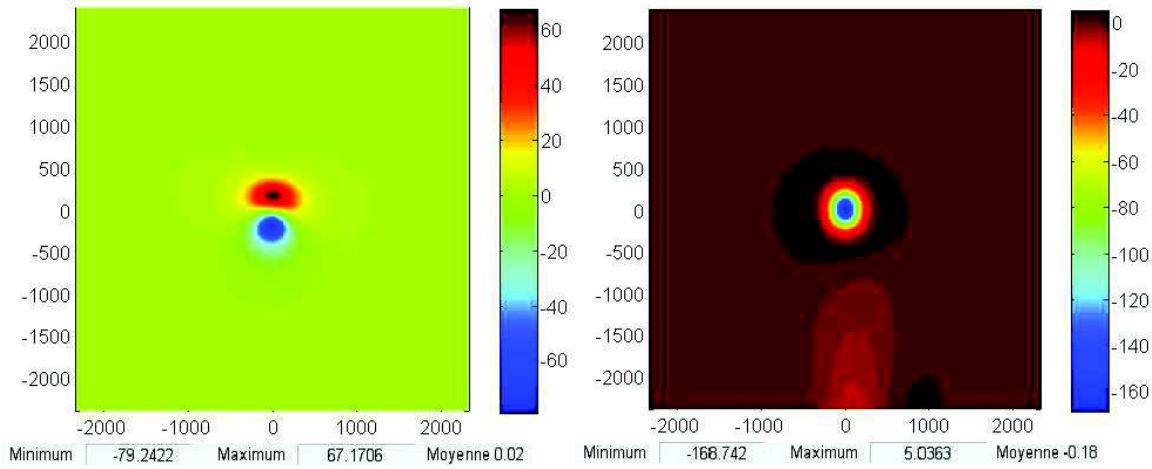
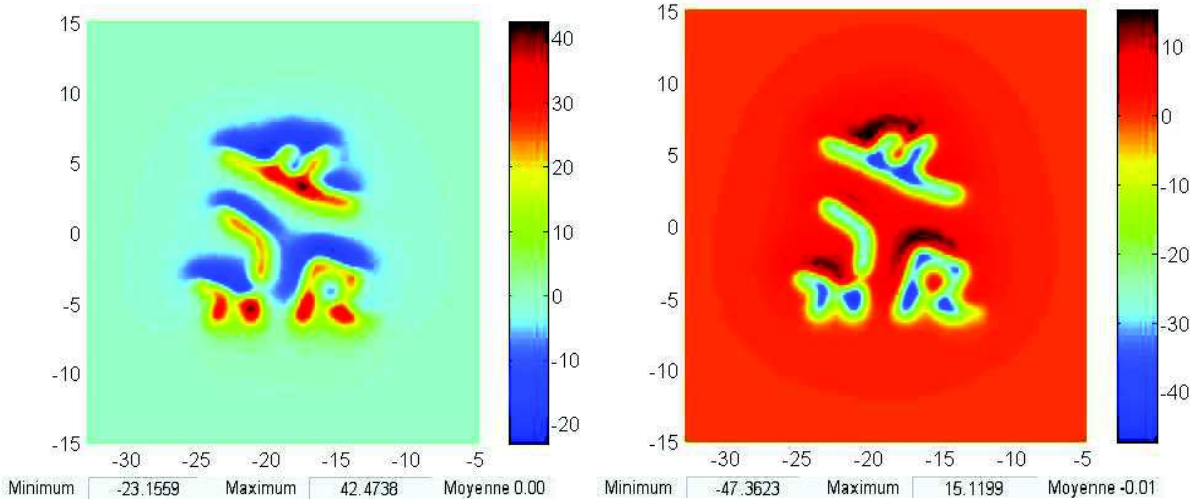


Figure 4.13 ***carte d'anomalie magnétique pour une structure rectangulaire de 2 m de largeur, 3 m de longueur et 2 m de profondeur à aimantation rémanente à 15° d'inclinaison à gauche et double réduction au pôle à droite.***

Pour notre cas synthétique du secteur 6 des fouilles d'Al-Rawda, la figure 4.14 montre la carte d'anomalie magnétique, la transformation en réduction au pôle simple (52° d'inclinaison) et en double réduction au pôle.



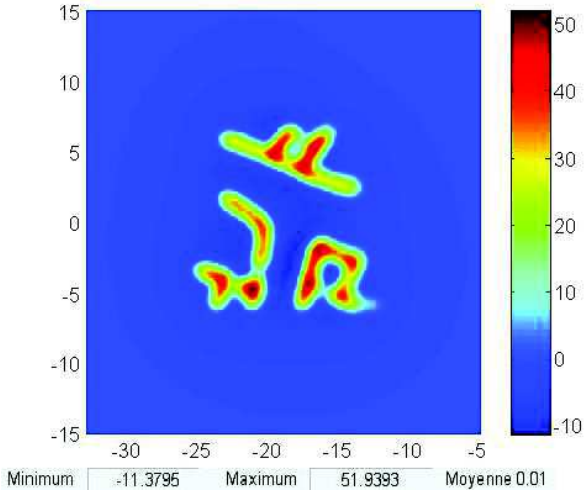


Figure 4.14 ***carte d'anomalie magnétique du cas synthétique basé sur la fouille du secteur 6(site Al-Rawda), simple réduction au pôle et double réduction au pôle.***

On comprend mieux de la figure 4.14 qu'en faisant la double réduction au pôle, la compréhension de la géométrie des structures aimantées du sous-sol sera améliorée lorsque l'on s'intéressera aux données.

14.2. L'opérateur de dérivation

Les vestiges archéologiques se trouvent généralement à des profondeurs qui varient entre la surface de la terre et plusieurs mètres de profondeur. Même si la source causative de l'anomalie est ainsi située en proche surface, plusieurs structures aimantées assez proches peuvent produire un champ magnétique proche de celui d'une structure unique. L'opérateur de dérivation verticale permet d'améliorer la séparation des anomalies mais aussi de les rendre plus marquées.

Par ailleurs, les levés en archéomagnétisme sont souvent réalisés en gradiométrie verticale mais aussi en champ magnétique dans certains cas. La dérivation verticale permet de calculer ce que seraient la gradiométrie verticale lorsque l'on dispose d'une carte de champ magnétique.

Pour cet opérateur comme pour le précédent, les opérations sont plus simples en domaine spectral. Pour passer du domaine spatial au domaine spectral, on utilise la fonction de transformée de Fourier. Si la fonction $h(x, y, z)$ admet un spectre, alors sa transformée de Fourier est (e.g., Bhattacharyya, 1966)

$$h(x, y, z) = \iiint H(u, v, w) e^{-2i\pi(ux+vy+wz)} dudvdw \tag{29}$$

où u, v et w sont les pulsations correspondant respectivement à x, y et z.

La dérivée directionnelle dans la direction $\vec{a}$ pour un espace à trois dimensions est définie par

$$\frac{\partial}{\partial \vec{a}} = l\frac{\partial}{\partial x} + m\frac{\partial}{\partial y} + n\frac{\partial}{\partial z} \tag{30}$$

avec l, m, n les cosinus directeurs de $\vec{a}$.

On a alors pour la dérivée de $h(x, y, z)$ dans la direction $\vec{a}$

$$\frac{\partial}{\partial \vec{a}} h(x, y, z) = \iiint H(u, v, w) \left(l\frac{\partial}{\partial x} + m\frac{\partial}{\partial y} + n\frac{\partial}{\partial z} \right) e^{-2i\pi(ux+vy+wz)} dudvdw \tag{31}$$

Qui permet d'obtenir immédiatement pour l'expression de l'opérateur de dérivation

$$-2i\pi(lu + mv + nw) \tag{32}$$

puisque $\frac{\partial}{\partial x} e^{-2i\pi ux} = -2i\pi u e^{-2i\pi ux}$

La dérivée seconde consiste à répéter l'opération et l'intégration consiste à faire l'opération inverse de la dérivation. Nous avons alors pour l'opérateur de dérivation à l'ordre n

$$(-2i\pi(lu + mv + nw))^n \tag{33}$$

où n est l'ordre de la dérivation (positif) ou d'intégration (négatif). Plus récemment, Cooper et Cowan (2003) ont repris la notion de dérivée fractionnaire et ont montré que l'utilisation d'un nombre réel pour l'opérateur de dérivation ne pose pas de problème particulier.

L'expression que nous avons pour l'opérateur de dérivation n'est pas applicable à des données car nous avons soit une carte, fonction à deux dimensions, soit un profil, fonction à une dimension.

Comme le laplacien est nul en dehors des sources, nous avons

$$\Delta h = \frac{d^2h}{dx^2} + \frac{d^2h}{dy^2} + \frac{d^2h}{dz^2} = 0 \tag{34}$$

Qui a pour expression spectrale

$$4\pi(u^2 + v^2 + w^2)H = 0. \tag{35}$$

Etant donné que H est non nul, on a alors par exemple

$$w = \pm i\sqrt{u^2 + v^2} \tag{36}$$

Que l'on peut reporter dans l'équation de l'opérateur

$$\left(-2i\pi(lu + mv \pm in\sqrt{(u^2 + v^2)})\right)^n \tag{37}$$

C'est l'expression qui est utilisée pour une carte.

Pour un profil, on considère que tout est invariant dans la direction orthogonale au profil et on peut alors considérer uniquement le cas $v = 0$, d'ou

$$(-2i\pi(lu \pm in|u|))^n \qquad (38)$$

Enfin, l'opérateur dans la direction verticale correspond au cas particulier $l = m = 0, n = 1$.

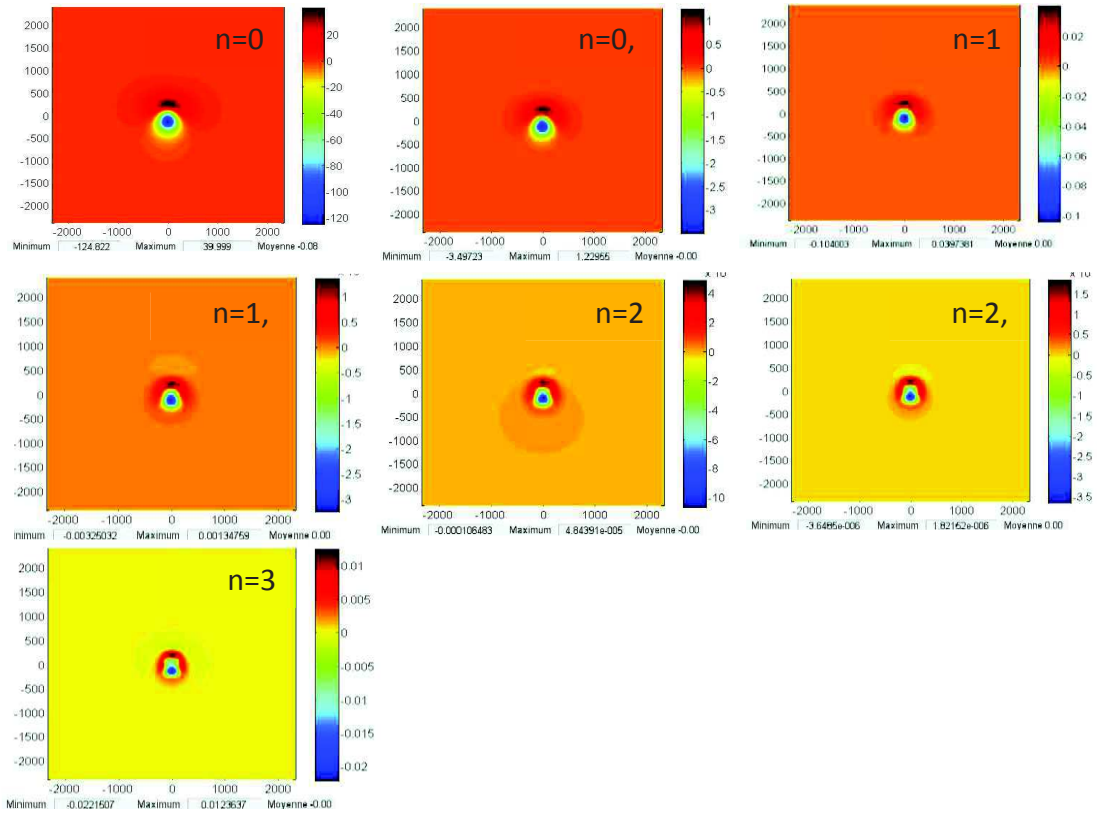


Figure 4.15 ***application de l'opérateur de dérivation verticale à différents ordres, 0,5 à 3, pour un champ magnétique et une aimantation d'inclinaison de 52°. Les échelles de distance sont en centimètre.***

Pour une structure rectangulaire de 2 m dans la direction est-ouest et de 3 m dans la direction nord-sud placée à 2 m de profondeur on calcule la carte d'anomalie magnétique puis les dérivées verticales d'ordre 0,5 à 3 (Figure 4.15). On observe que pour l'anomalie magnétique on a une forme de l'anomalie magnétique similaire à celle résultant d'un dipôle. Avec l'augmentation de l'ordre de dérivation, la forme rectangulaire apparait progressivement et c'est à l'ordre 2, que l'on peut s'assurer que la structure n'est pas ponctuelle.

Pour une structure rectangulaire de 2 m dans la direction est-ouest et de 3 m dans la direction nord-sud placée à 2 m de profondeur on calcule la carte d'anomalie magnétique puis les dérivées verticales d'ordre 0,5 à 3 (Figure 4.15). On observe que pour l'anomalie magnétique on a une forme de l'anomalie magnétique similaire à celle résultant d'un dipôle. Avec l'augmentation de l'ordre de dérivation, la forme rectangulaire apparait

progressivement et c'est à l'ordre 2, que l'on peut s'assurer que la structure n'est pas ponctuelle

On refait le même calcul, mais en pratiquant une double réduction au pôle (Figure 4.16).

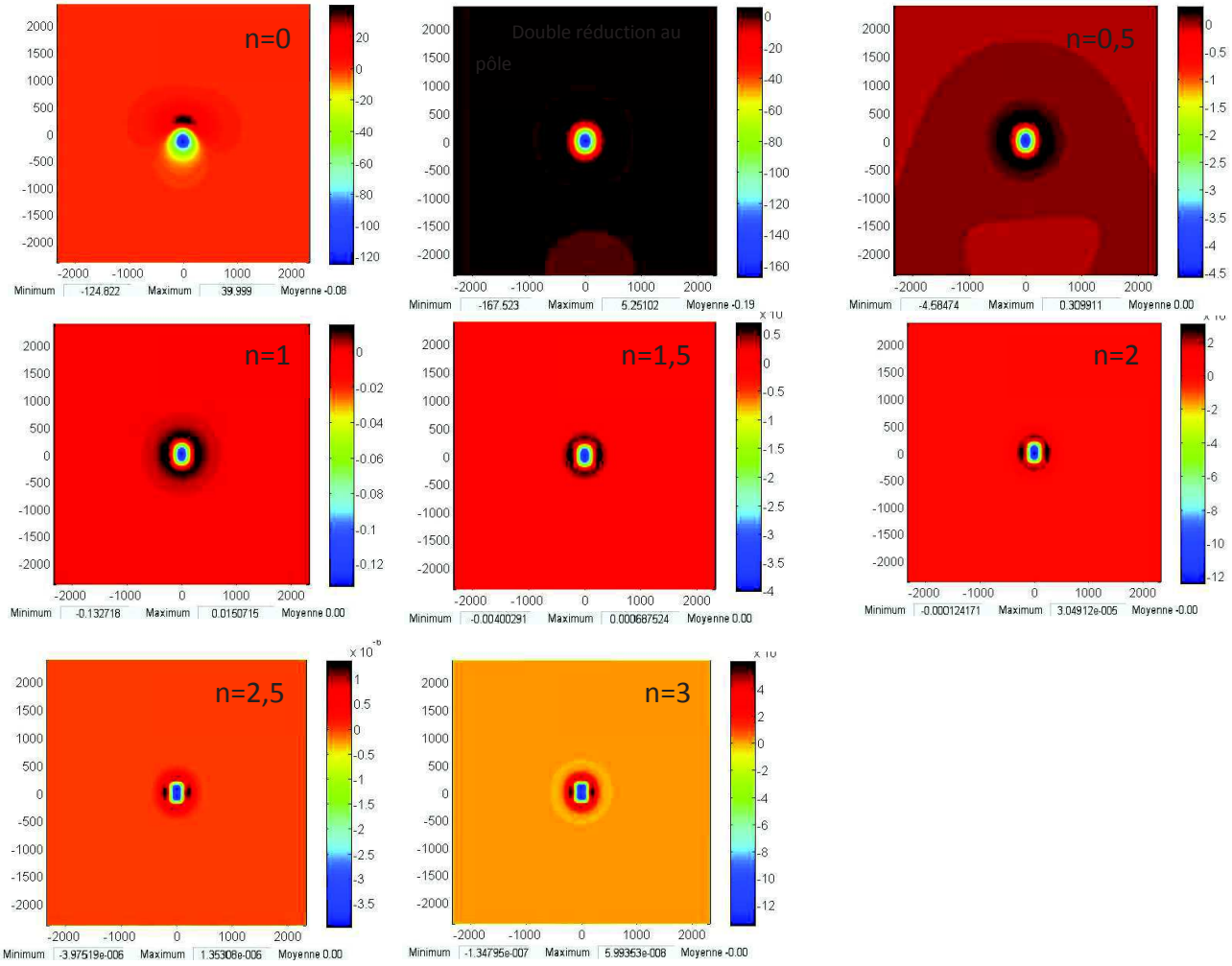


Figure 4.16 ***application de l'opérateur de dérivation verticale sur la carte magnétique (en haut à gauche) double réduite au pôle (en haut au milieu) à différents ordres, 0,5 à 3, pour un champ magnétique et une aimantation d'inclinaison de 52°. Les échelles de distance sont en centimètre.***

On remarque, comme on pouvait s'y attendre, qu'avec l'anomalie magnétique réduite au pôle on voit beaucoup mieux apparaitre la géométrie de la structure et que la forme est assez bien établie avec un ordre 2 de dérivation. Afin de mieux visualiser cela, la figure 4.17 montre la carte d'anomalie magnétique, la double réduite au pôle et la dérivée d'ordre 2 après double réduction au pôle.

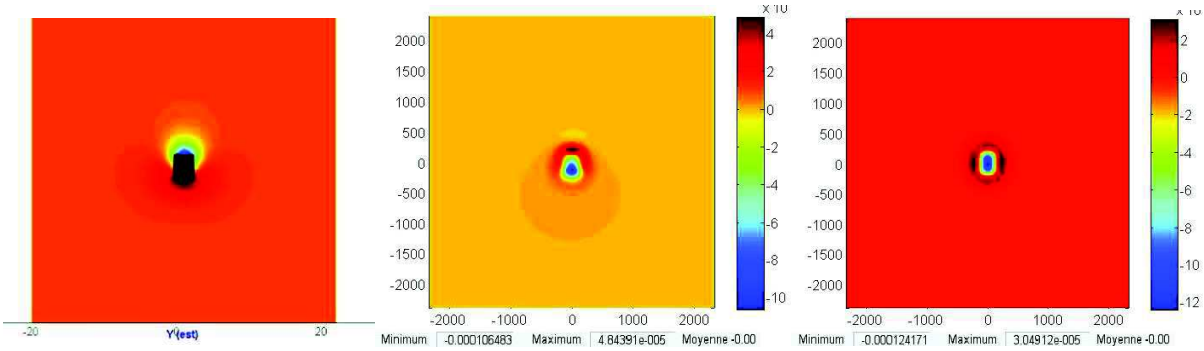


Figure 4.17 ***carte d'anomalie magnétique à gauche avec la structure rectangulaire dessinée en noir, dérivation verticale d'ordre 2 au milieu et dérivée verticale d'ordre 2 sur la double réduction au pôle à droite.***

Une meilleure façon d'observer ce qui se passe est de faire le calcul de dérivation sur profil. On calcule l'anomalie magnétique pour une structure de 5 m de large et à une profondeur de 1,6 m. La courbe en rouge de la figure 4.18 correspond au profil de l'anomalie magnétique et la courbe en bleu à la dérivée verticale à différents ordres.

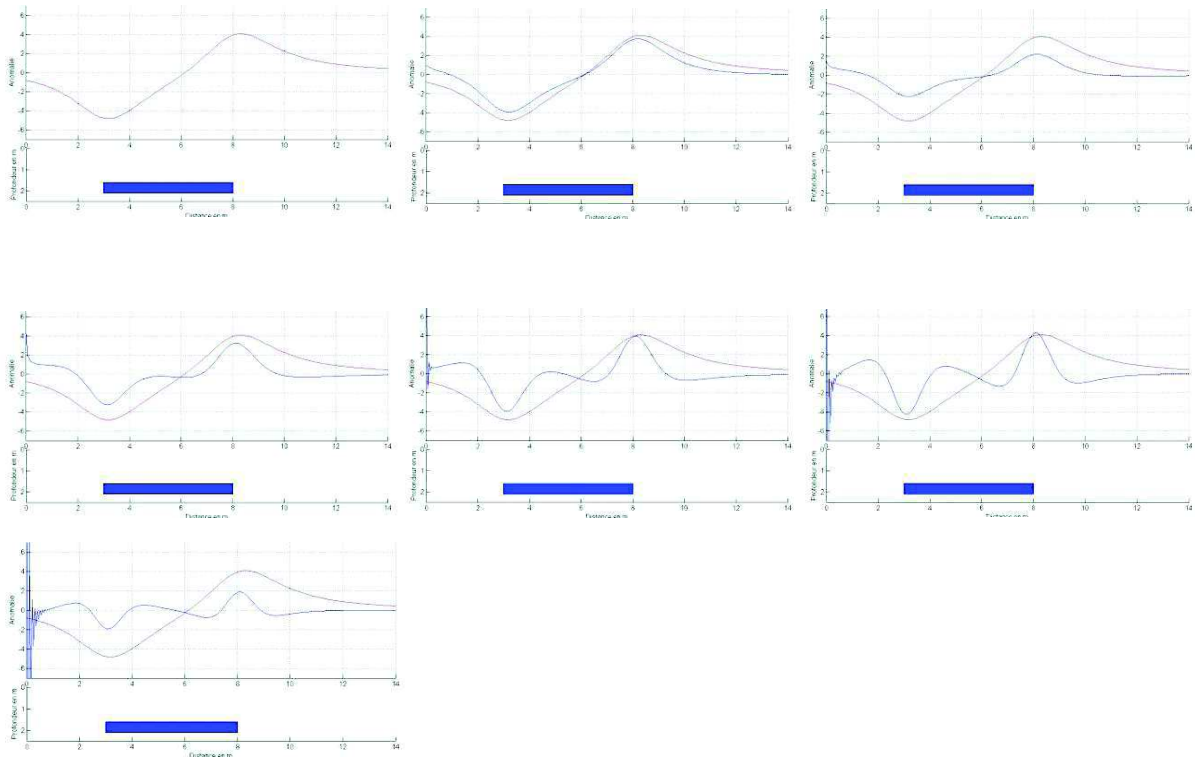


Figure 4.18 ***application de l'opérateur de dérivation verticale à différents ordres, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 et 3 pour un structure rectangulaire de 5 m de large et à 1.6 de profondeur.***

La distance horizontale entre le maximum et le minimum est la largeur de structure. Le meilleur résultat qui met en évidence cette largeur est la dérivation verticale à partir de l'ordre 1.5 (Figure 4.18)

Pour mieux comprendre le problème de mise en évidence des bords des structures par dérivation verticale, on définit un nouveau cas synthétique à deux structures. Leur largeur dans la direction est-ouest est de 2 m et de 3 m dans la direction nord-sud. Leur profondeur est à 2 m. La distance entre les deux structures est de 1 m (Figure 4.19).

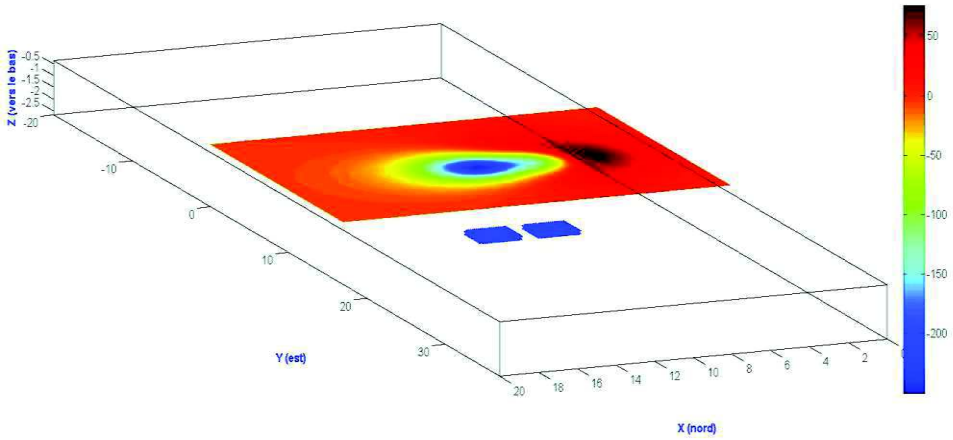
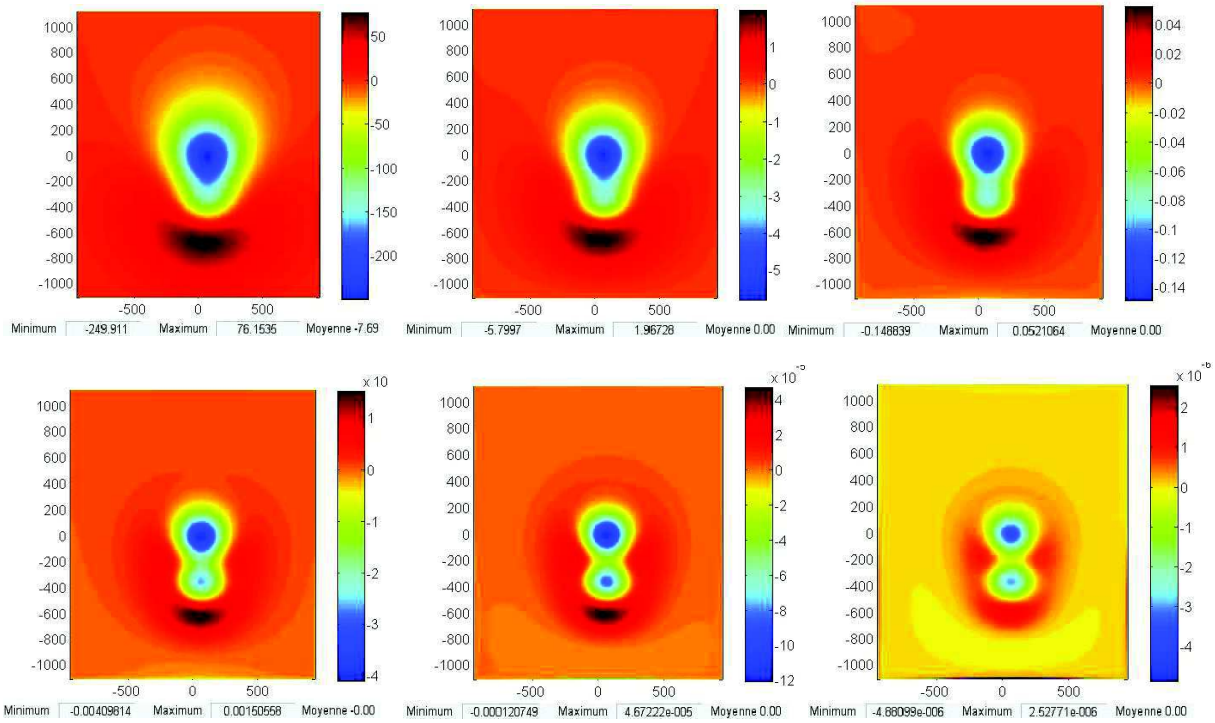


Figure 4.19 ***Carte d'anomalie magnétique pour un cas synthétique de deux structures à 2 m de profondeur.***

On a calculé la dérivation verticale pour différents ordres (Figure 4.20)



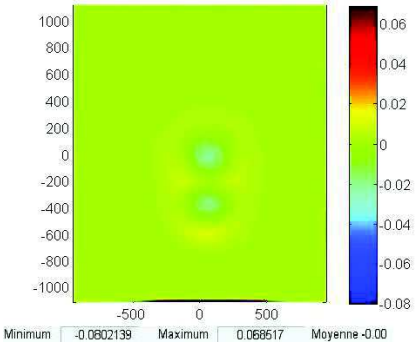


Figure 4.20 ***application de l'opérateur de dérivation verticale à différents ordres (0, 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5 et 3) pour un cas synthétique correspondant à deux structures.***

Sur la carte d'anomalie magnétique on observe une forme qui laisse à penser à une seule structure. À partir de la dérivation verticale d'ordre 1, les deux structures commencent à se séparer et elles sont complètement séparées à partir de l'ordre 2.

Le même type de calcul est fait sur profil avec un modèle constitué de deux rectangles de 1 m de large et à une profondeur de 1,6 m. La distance entre les deux structures est de 5 m (Figure 4.21).

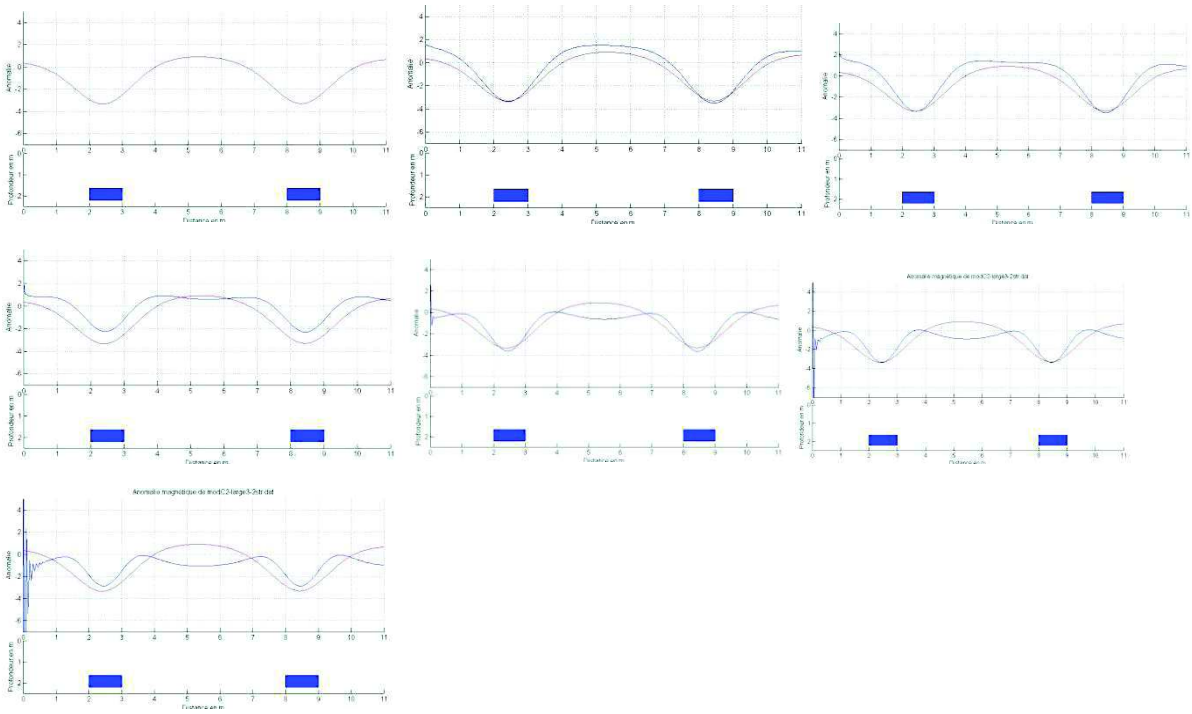


Figure 4.21 ***application de l'opérateur de dérivation verticale à différents ordres (0, 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5 et 3) pour un modèle de deux structures à 1.6 de profondeur.***

Avec l'ordre de dérivation, on voit l'effet des deux structures apparaitre progressivement. La séparation commence à partir de la dérivation verticale d'ordre 1.

Une autre façon d'étudier ce pouvoir de séparation est de prendre une plaque unique et de faire varier sa largeur. C'est ce que nous avons à la figure 4.22 pour une plaque à 1,6 m de profondeur, on fait varier sa largeur de 5,0 à 0,5 m avec un pas de 0,5 m. Si la larguer est inférieure à 1,5 m on ne voit plus l'effet de la largeur de la structure

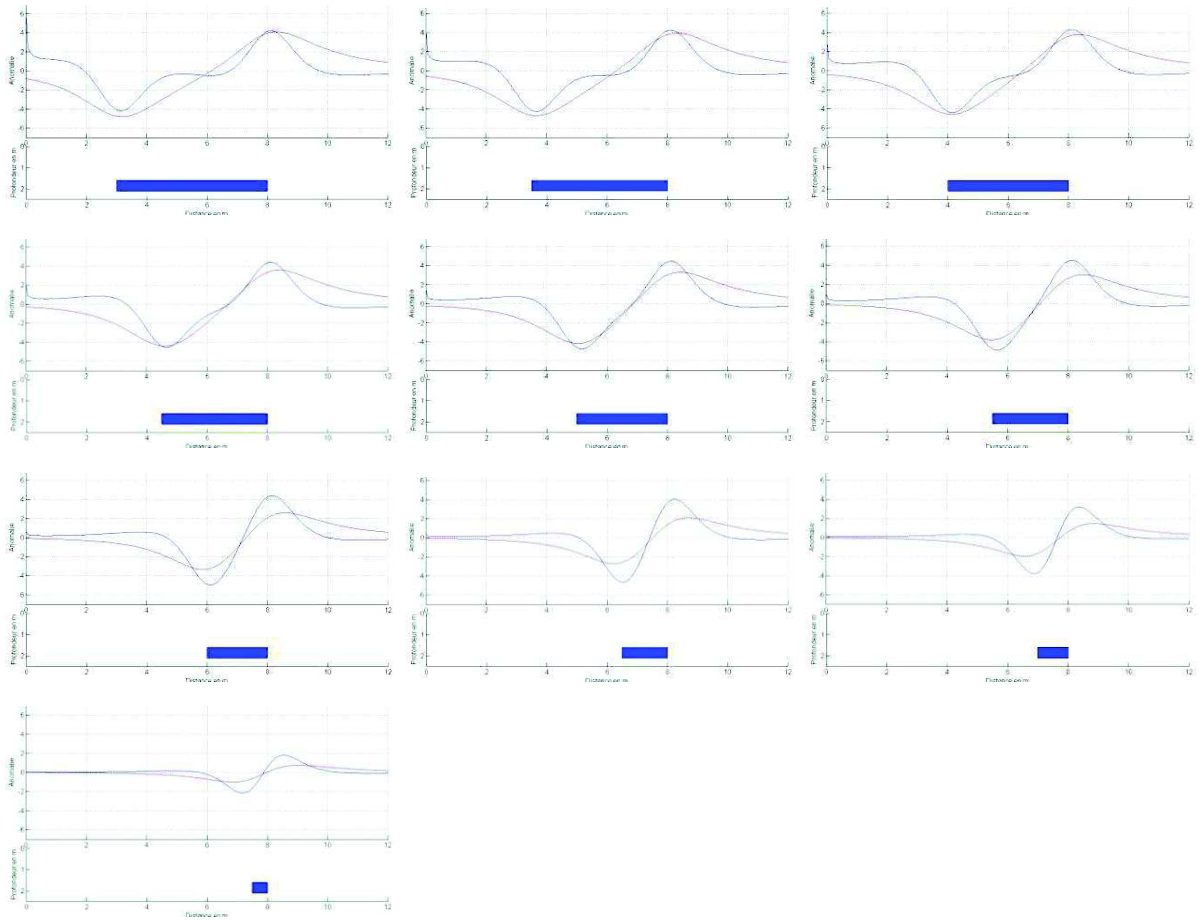
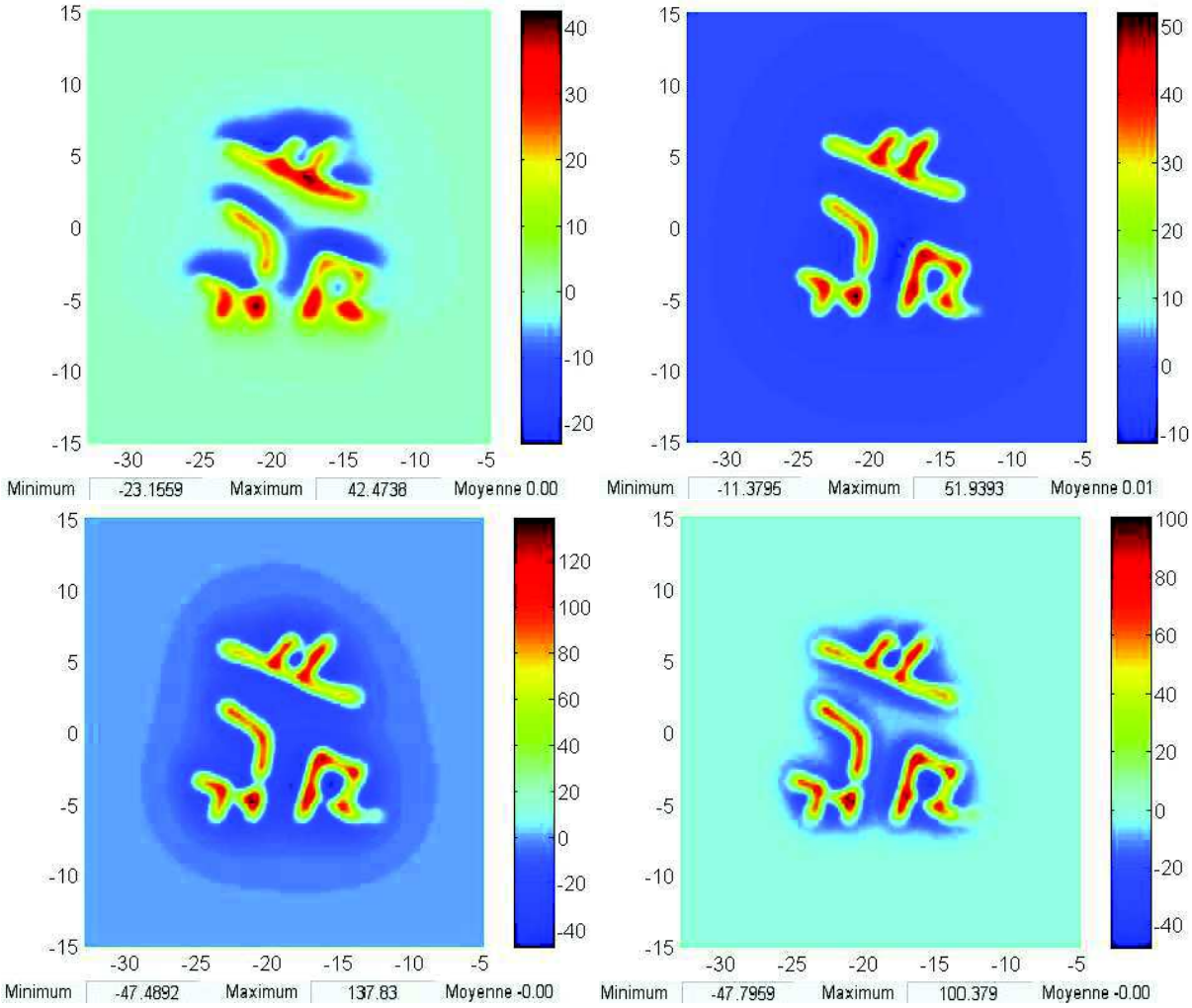


Figure 4.22 ***Pour un opérateur de dérivation verticale d'ordre 1.5, forme de la dérivée en fonction de la largeur pour une structure à 1.6 m de profondeur.***

Enfin, on a appliqué l'opérateur de dérivation verticale à différents ordres au cas synthétique basé sur la fouille du secteur 6 d'Al-Rawda (Figure 4.23)


Minimum -23.1559 Maximum 42.4738 Moyenne 0.00
Minimum -11.3795 Maximum 51.9393 Moyenne 0.01
Minimum -47.4892 Maximum 137.83 Moyenne -0.00
Minimum -47.7959 Maximum 100.379 Moyenne -0.00

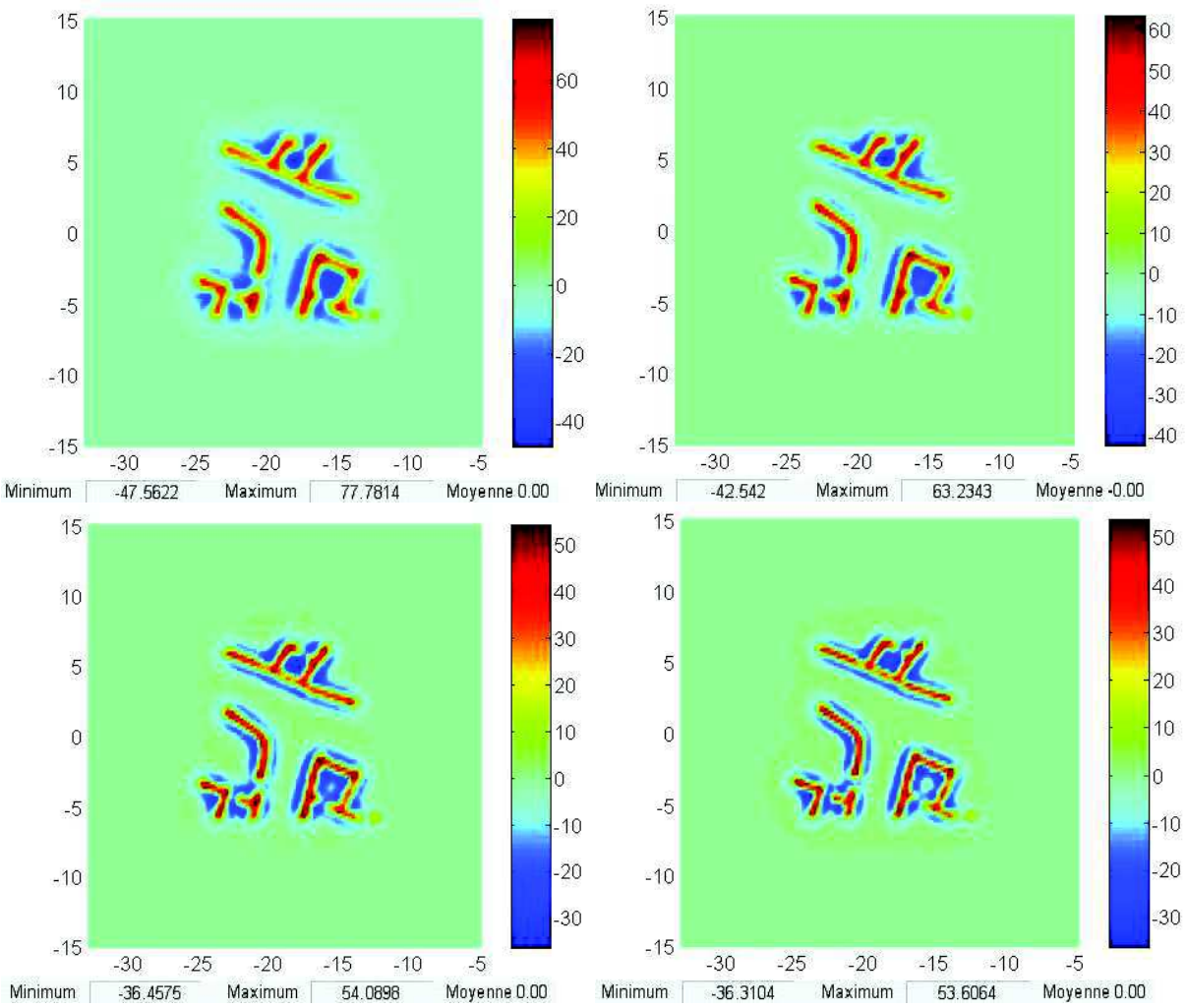


Figure 4.23 ***carte d'anomalie magnétique du cas synthétique puis double réduction au pôle puis opérateurs de dérivation verticale d'ordre 0.5, 1, 1.5, 2 , 2.5, 3 respectivement.***

La figure 4: 23 montre aussi que les structures apparaissent plus précisément avec l'augmentation de l'ordre de la dérivation verticale, cela confirme ce que l'on a obtenu pour un structure rectangulaire.

14.3. L'opérateur de prolongement

Cet opérateur permet de calculer une carte d'anomalie magnétique à une altitude différente par rapport à une carte initiale (Bhattacharyya, 1965). Le prolongement vers le haut atténue les amplitudes et augmente la longueur d'onde des anomalies alors que l'opérateur de prolongement vers le bas augmente les amplitudes et diminue les longueurs d'onde des anomalies. Un des intérêts de l'opérateur est de permettre de mieux comprendre la répartition des aimantations en profondeur. En effet, en faisant un prolongement vers le haut, des anomalies magnétiques dues à des aimantations superficielles seront atténuées plus vite que celles plus profondes.

Soit $h(x, y, z)$ une fonction dans l'espace, dont le laplacien est nul. Si on s'intéresse à une carte à une altitude donnée z_1, on a pour le laplacien

$$\frac{d^2}{dx^2}h(x, y, z_1) + \frac{d^2}{dy^2}h(x, y, z_1) + \frac{d^2}{dz^2}h(x, y, z_1) = 0 \tag{39}$$

ce qui donne dans le domaine spectral

$$-4\pi^2(u^2 + v^2)H_{z1}(u, v, z_1) + \frac{d^2}{dz^2}H_{z1}(u, v, z_1) = 0 \tag{40}$$

qui est une équation différentielle du deuxième ordre admettant comme solution.

$$H_{z1}(u, v, z_1) = H(u, v, 0)e^{2\pi\sqrt{u^2+v^2}z_1} \tag{41}$$

L'opérateur de prolongement pour une carte est donc

$$H_{pro} = e^{2\pi\sqrt{u^2+v^2}z_1} \tag{42}$$

et pour un profil

$$H_{pro} = e^{2\pi|u|z_1} \tag{43}$$

On a deux cas :

Le prolongement vers le haut quand $z_1 > 0$. On dit souvent que l'opérateur correspond à un filtre passe-bas. Cependant il est beaucoup plus intéressant qu'un filtre passe-bas car il atténue les anomalies d'autant plus qu'elles sont superficielles.

Le prolongement vers le bas quand $z_1 < 0$. L'opérateur augmente rapidement les amplitudes et diminue les longueurs d'ondes d'autant plus quand les sources sont superficielles. L'équation de départ, le laplacien égal à zéro, fait qu'il n'est pas possible de prolonger plus bas que les sources les plus superficielles. Pratiquement, la limitation apparait généralement plutôt en raison de la présence de bruit, mais aussi de la forme de l'opérateur : pour un prolongement de une unité (le pas de la grille) l'opérateur à une dynamique de 1 à 7228 selon les valeurs des fréquences. Pour deux unités, la dynamique devient 1 à $5{,}2.10^7$. Cela fait que l'on est très vite confronté à des instabilités numériques.

Pour illustrer, on a calculé deux prolongements vers le haut à 1 m et 3 m après application de la double réduction au pôle pour les cas synthétiques habituels (Figure 4.24).

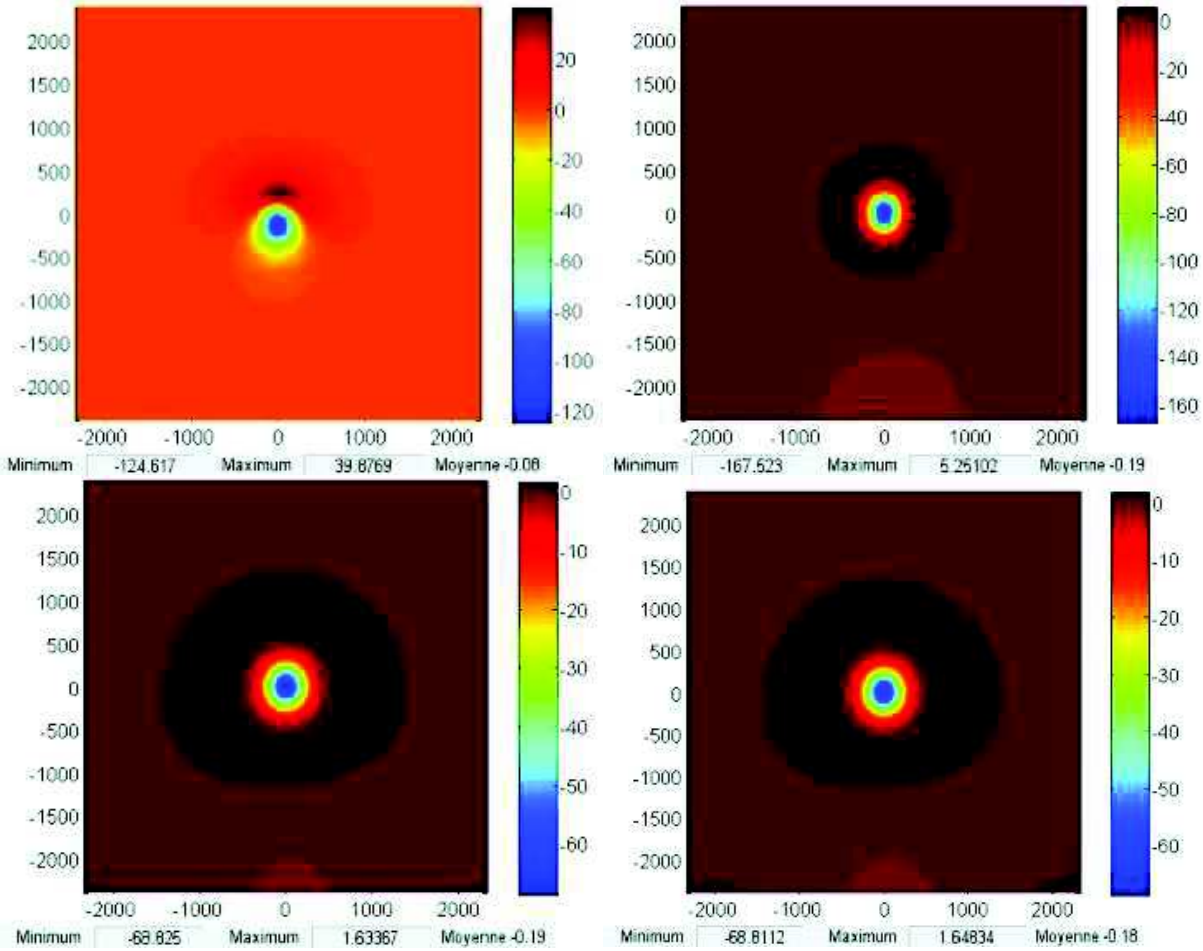


Figure 4.24 ***carte d'anomalie magnétique pour un cas synthétique à 2 m de profondeur puis double réduction au pôle puis prolongement vers le haut à 1 m. La dernière carte correspond à l'anomalie magnétique de la même structure mais à 3 m de profondeur avec double réduction au pôle. Elle est identique à la carte précédente.***

La figure au-dessus montre que la géométrie de structure apparait moins clairement si on augmente le prolongement vers le haut.

Dans la figure 4.25 on fait le contraire, le prolongement vers le bas est de 1 m après l'application de l'opérateur de double réduction au pôle pour le même cas synthétique puis on a calculé l'anomalie de la structure à 1 m de moins et on a obtenu le même résultat que le prolongement vers le bas de 1 m.

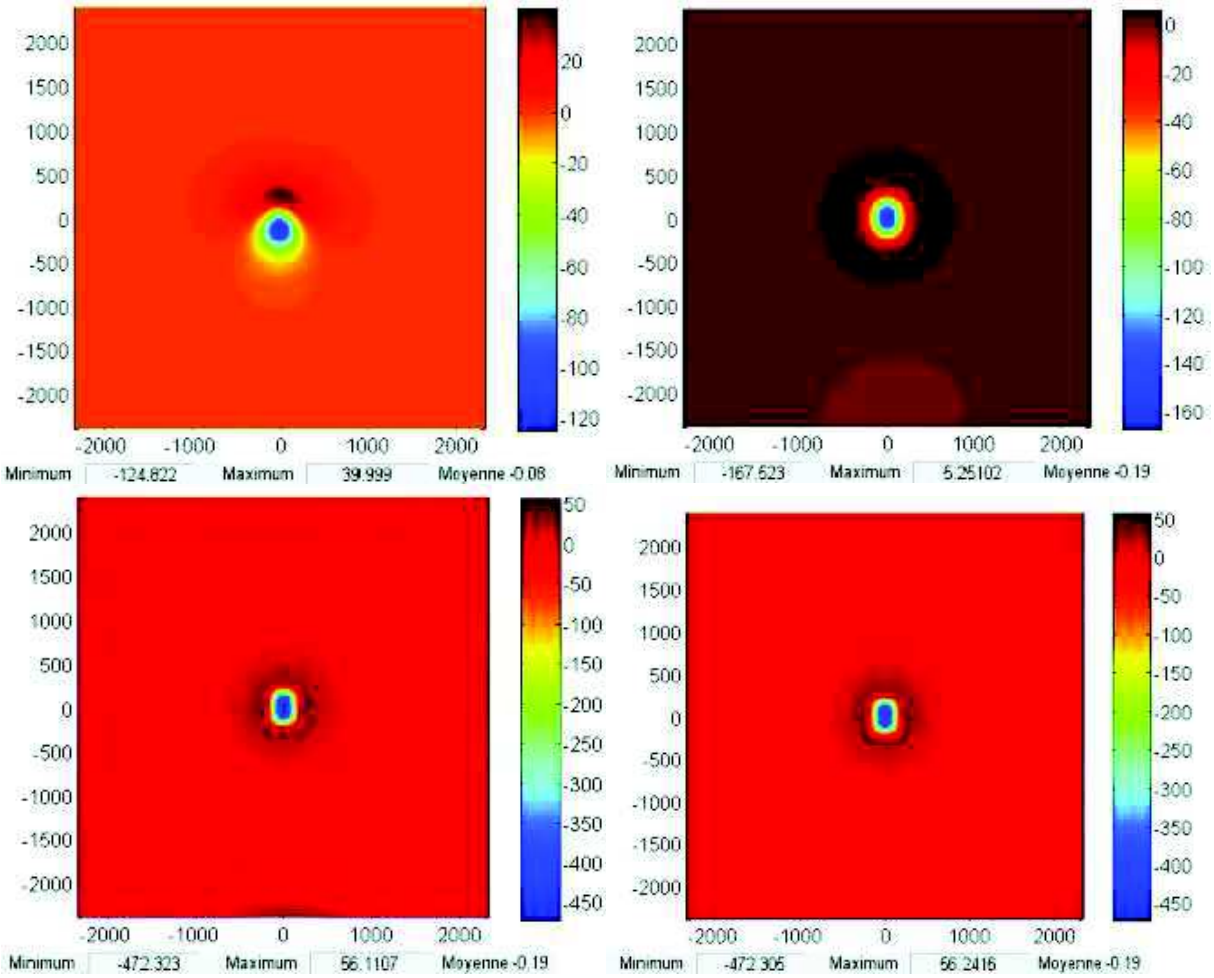


Figure 4.25 ***carte d'anomalie magnétique pour un cas synthétique à 2 m de profondeur puis double réduction au pôle puis prolongement vers le bas à 1 m. La dernière carte correspond à l'anomalie magnétique de la même structure mais à 1 m de profondeur avec double réduction au pôle. Elle est identique à la carte précédente.***

Enfin, on montre l'effet du prolongement pour le cas synthétique de la fouille du secteur 6 d'Al-Rawda (Figure 4.26).

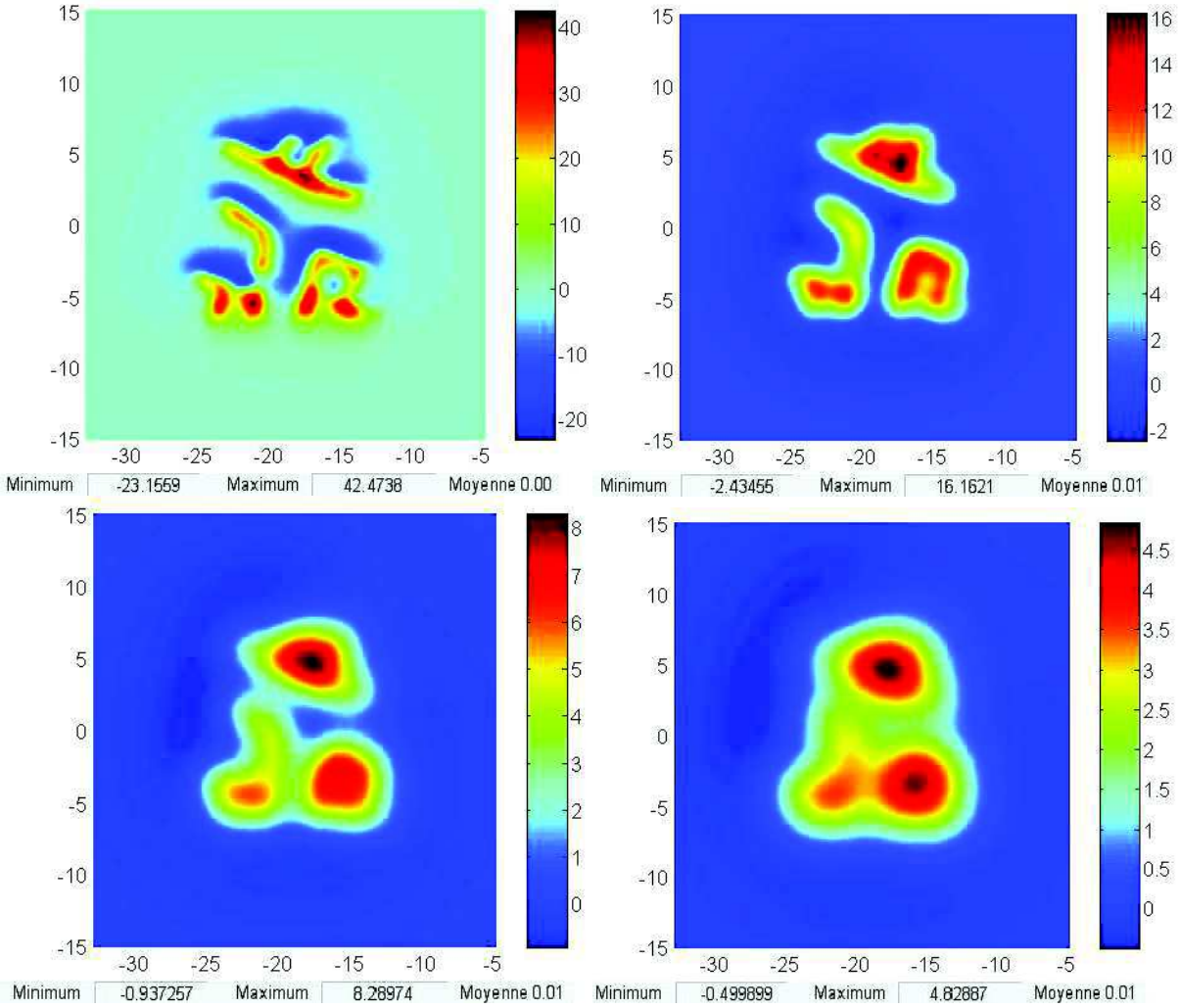


Figure 4.26 ***carte d'anomalie magnétique du cas synthétique basé sur la fouille du secteur 6 d'Al-Rawda et prolongements vers le haut à 1, 2 et 3 m.***

La figure 4.27 confirme les résultats obtenus pour une structure simple où on voit la disparition de la forme de la structure avec l'augmentation du prolongement vers le haut. Par contre, le prolongement d'un mètre vers le bas fait que la forme de la structure apparait mieux mais si on augmente le prolongement vers le bas, le bruit augmente jusqu'à rendre les données invisibles.

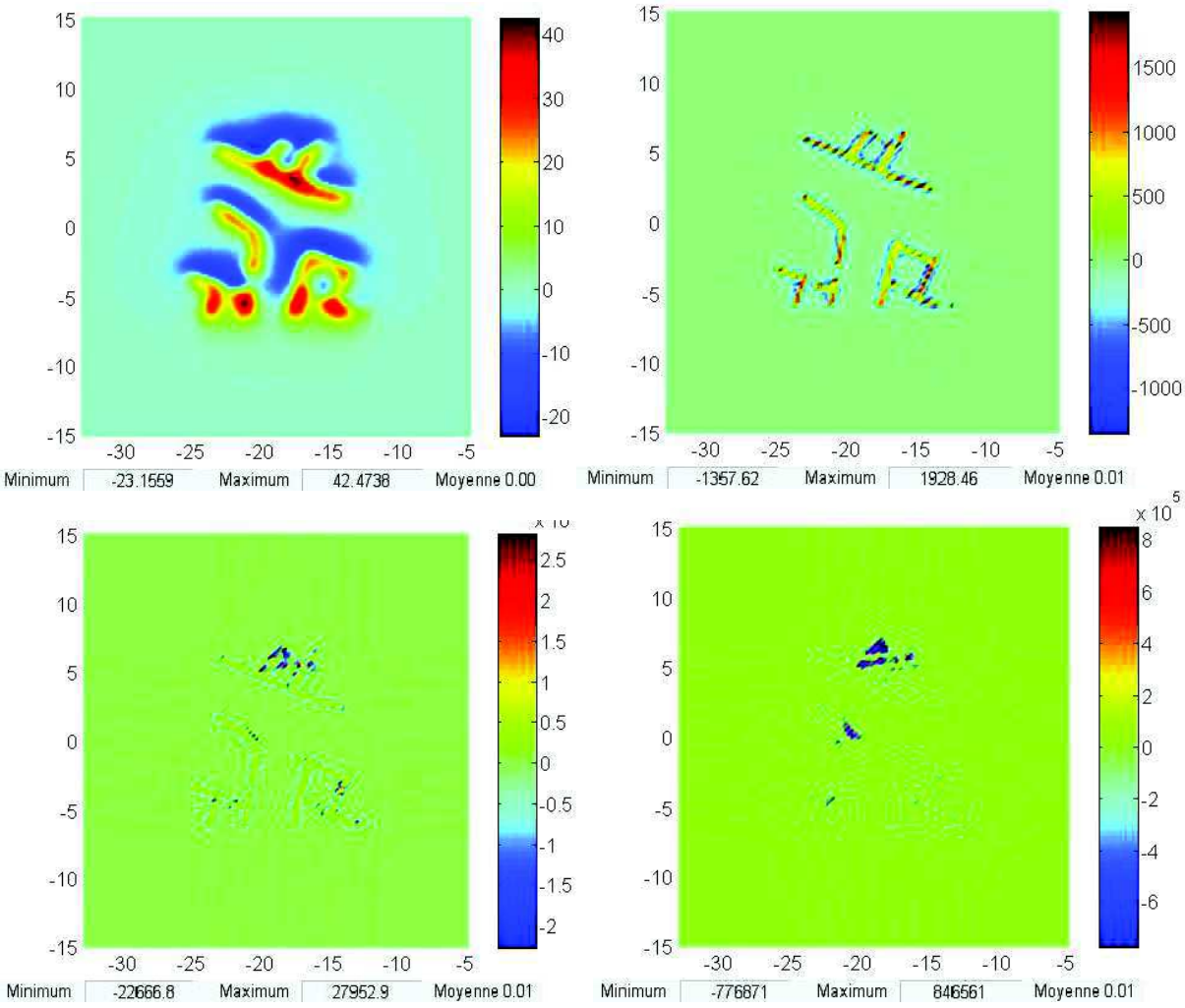


Figure 4.27 ***carte d'anomalie magnétique pour le cas synthétique basé sur la fouille du secteur 6 d'Al-Rawda et prolongements vers le bas à 1, 1,25 et 1.5 m.***

14.4. Le signal analytique

Nabighian (1972) a proposé pour la première fois l'utilisation de la notion de signal analytique appliquée au magnétisme. Plus précisément, il s'intéresse à un corps à deux dimensions. Soit $F(x)$ l'anomalie de l'intensité du champ magnétique due au corps infini dans une direction horizontale et décrit dans la figure 4.28. On a

$$F(x) = 2kfc\, sin(d)\left[(\theta_1 - \theta_2)\, cos(\varphi) + sin(\varphi) In \frac{r_1}{r_2}\right] \quad (44)$$

avec k la susceptibilité du corps aimanté, $c = 1 - (\cos(i))^2\left(sin(A)\right)^2$, $\varphi = 2I - d - 90$, i l'inclinaison du champ magnétique terrestre, A l'angle entre le nord magnétique et l'axe positif des x et $\tan(I) = \frac{\tan(i)}{\cos(A)}$

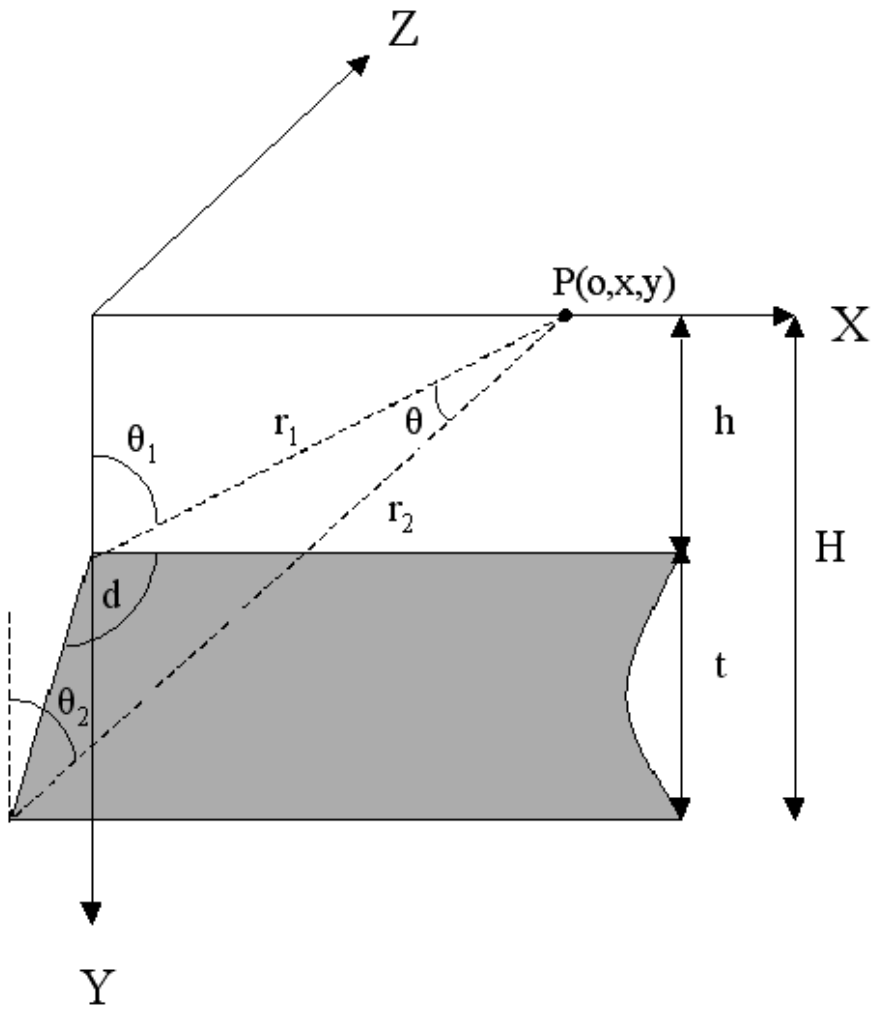


Figure 4.28 ***notations pour le calcul de l'anomalie de l'intensité du champ magnétique du corps de Nabighian (Bouiflane, 2008).***

La dérivée horizontale de l'anomalie magnétique par rapport à x en faisant tendre t vers l'infini est

$$F_x(x) = \frac{d}{dx}F(x) = 2kfc\,sin(d)\frac{(z_1 - y)\,cos(\varphi) + x\,sin(\varphi)}{(z_1 - y)^2 + x^2} \tag{45}$$

La dérivée verticale par rapport à y et en faisant tendre t vers l'infini est

$$F_y(x) = \frac{d}{dy}\,F(x) = 2kfc\,sin(d)\frac{x\,cos(\varphi) - (z_1 - y)\,sin(\varphi)}{(z_1 - y)^2 + x^2} \tag{46}$$

A ce stade, Nabighian observe que les deux dérivées sont transformées de Hilbert l'une de l'autre, les transformées de Hilbert directe et inverse se définissant par

$$h(\xi) = \frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{F(x)}{x - \xi}dx \tag{47}$$

et

$$F(x) = \frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{h(\xi)}{x - \xi}d\xi \tag{48}$$

Ce qui justifie d'introduire une nouvelle fonction complexe $S(x) = F_x(x) - iF_y(x)$ qui est la définition du signal analytique. Sa propriété est qu'elle est dérivable au sens des fonctions complexes. Pour le corps de la figure 4.28, le signal analytique est

$$S(z) = \frac{2kFc\,sin\,D\,e^{i\varphi}}{z_1 + iz} \tag{49}$$

Avec $z = x + iy$ et $z_1 = 0 + ih$.

Nabigian s'intéresse essentiellement au module de la fonction complexe,

$$|S(x)| = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \frac{2kfc\,sin(d)}{\sqrt{h^2 + x^2}} \qquad (50)$$

Qui a des propriétés remarquables : la courbe est symétrique, le maximum est à l'aplomb du point quel que soit l'aimantation et le champ magnétique régional, la décroissance de la courbe ne dépend que de la profondeur et, en particulier, la distance du maximum au demi maximum est égale à la profondeur.

Ce sont ces propriétés qui ont fait le succès de la méthode. Il faut toutefois remarquer que le modèle de Nabighian n'a aucune réalité physique, l'anomalie magnétique d'un tel modèle étant infinie. L'autre difficulté est l'application à des cartes, la transposition à des fonctions à trois variables n'étant pas possible mathématiquement. Pour une carte $F(x, y)$, ce qui a retenu est de prendre $|S(x, y)| = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$ (Roest et al., 1992). La notion d'ordre de signal analytique a aussi été introduite sous la forme

$$S_n(x, y, z) = \sqrt{\left[\frac{\partial^n f(x, y, z)}{\partial x^n}\right]^2 + \left[\frac{\partial^n f(x, y, z)}{\partial y^n}\right]^2 + \left[\frac{\partial^n f(x, y, z)}{\partial z^n}\right]^2}. \qquad (51)$$

n Désignant l'ordre du signal analytique.

Salem et al. (2002) ont calculé l'équation du signal analytique pour un dipôle. L'équation montre malheureusement que le maximum de l'amplitude du signal analytique n'est pas au-dessus de la source dans le cas général, mais que sa position dépend de la valeur de l'inclinaison. L'écart maximum est de 30% de la valeur de la profondeur pour une inclinaison de 30°. Salem et al. (2002) ont aussi proposé une méthode d'estimation de la profondeur pour des corps ponctuels basée sur le rapport de l'amplitude de signaux analytique d'ordre différents.

Toujours avec le même cas synthétique, on a calculé le module du signal analytique à différents ordres (Figure 4.29). La profondeur de la structure correspond assez bien à la distance entre le maximum et le demi-maximum et pour l'ordre 2 on commence à voir apparaitre la géométrie de l'objet.

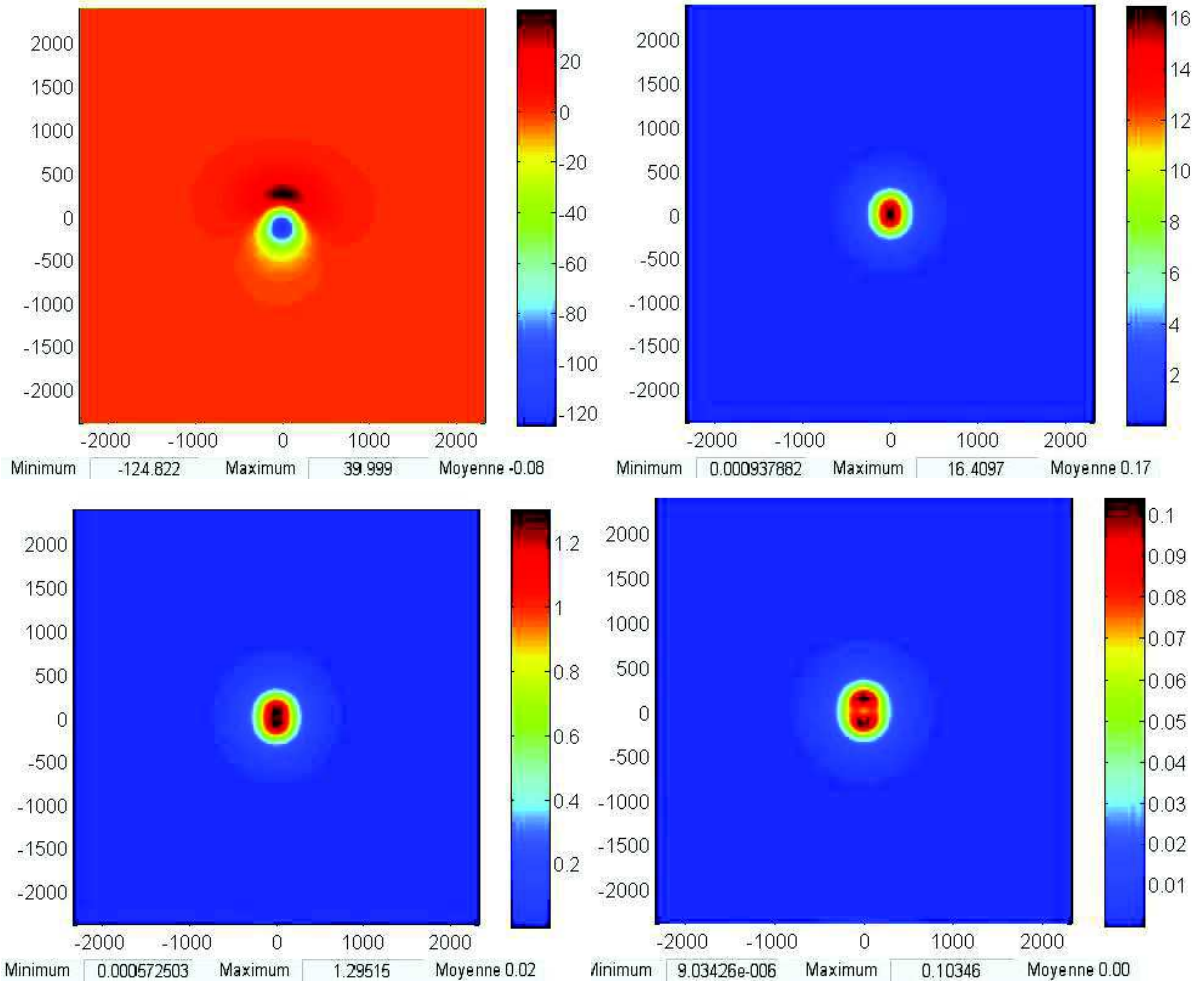


Figure 4.29 ***carte d'anomalie magnétique pour un cas synthétique, l'objet étant à 2 m de profondeur (à gauche) et module du signal analytique d'ordre 1, 2 et 3.***

On prenant une profondeur moins importante, 1 m au lieu de 2 m, le module du signal montre mieux la géométrie de l'objet (Figure 4.30).

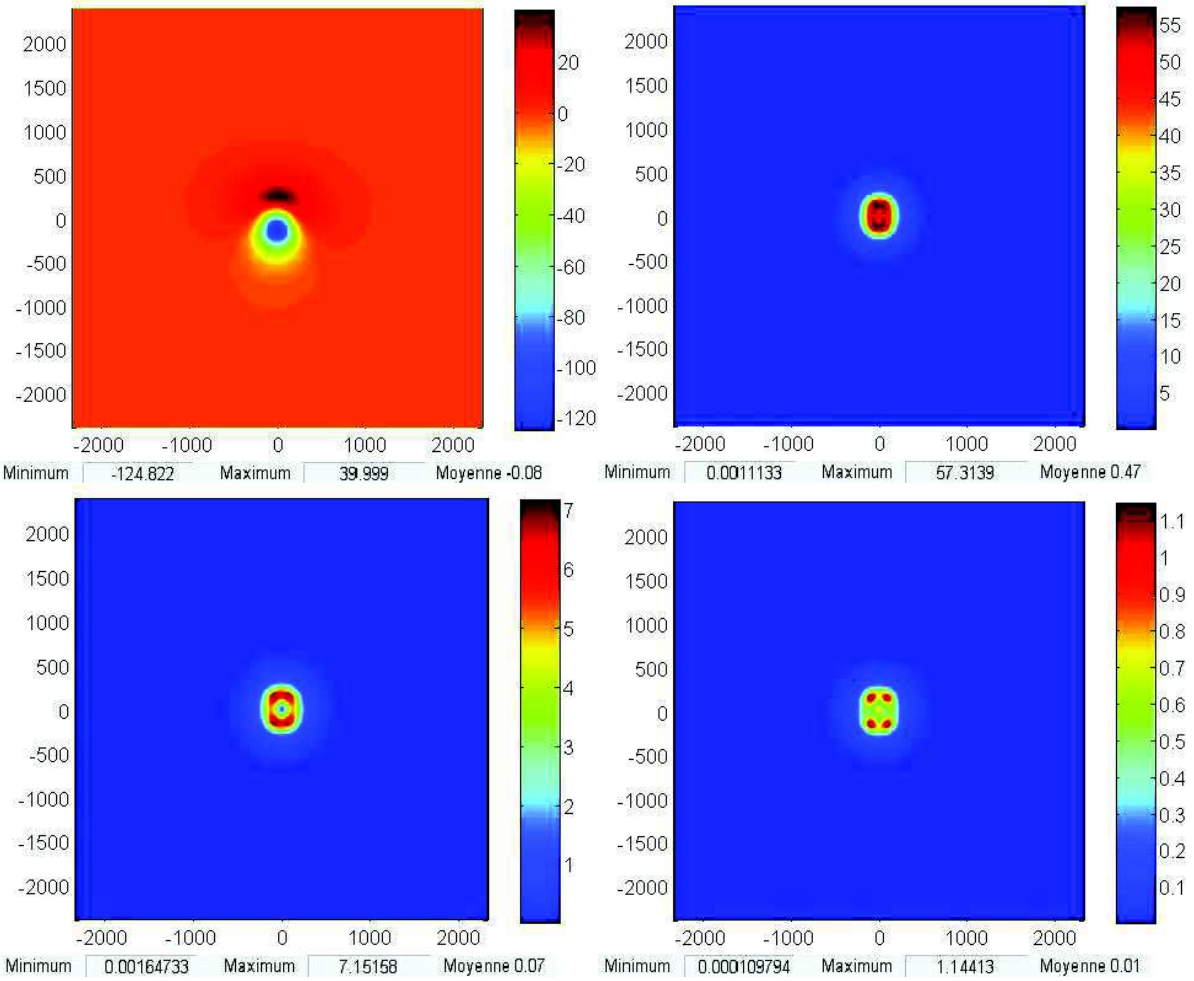


Figure 4.30 ***carte d'anomalie magnétique pour un cas synthétique, l'objet étant à 1 m de profondeur (à gauche) et module du signal analytique d'ordre 1, 2 et 3.***

On remarque sur la figure 4. 30 que la géométrie commence à apparaitre à partir de la carte du signal analytique d'ordre 1 et que la distance entre les deux maxima correspond à la largeur de la structure à partir de le signal analytique d'ordre 1. Dans le signal analytique d'ordre 3 on remarque qu'on a quatre maxima et de cette carte on peut voir la limite de la largeur de structure car la profondeur qui est de 1 m est inférieure à la largeur (2 m).

On a aussi calculé le signal analytique pour des profils comme dans les exemples précédents. Le corps a une largeur de de 5 m et une profondeur de 1,6 m (Figure 4.31).

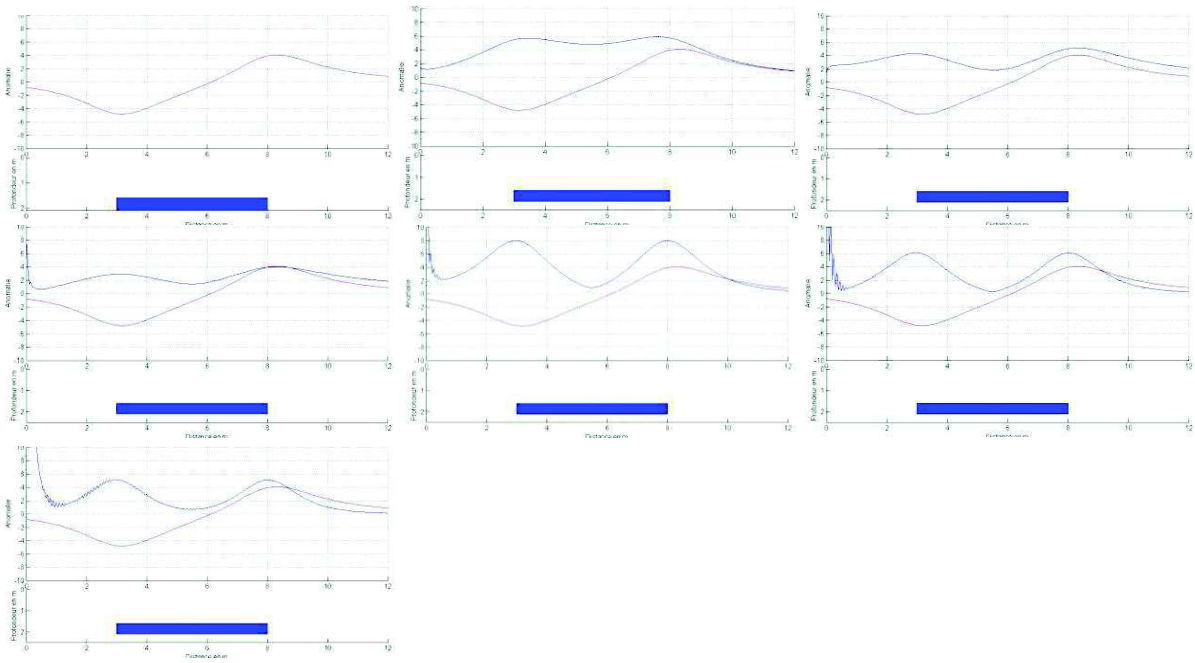
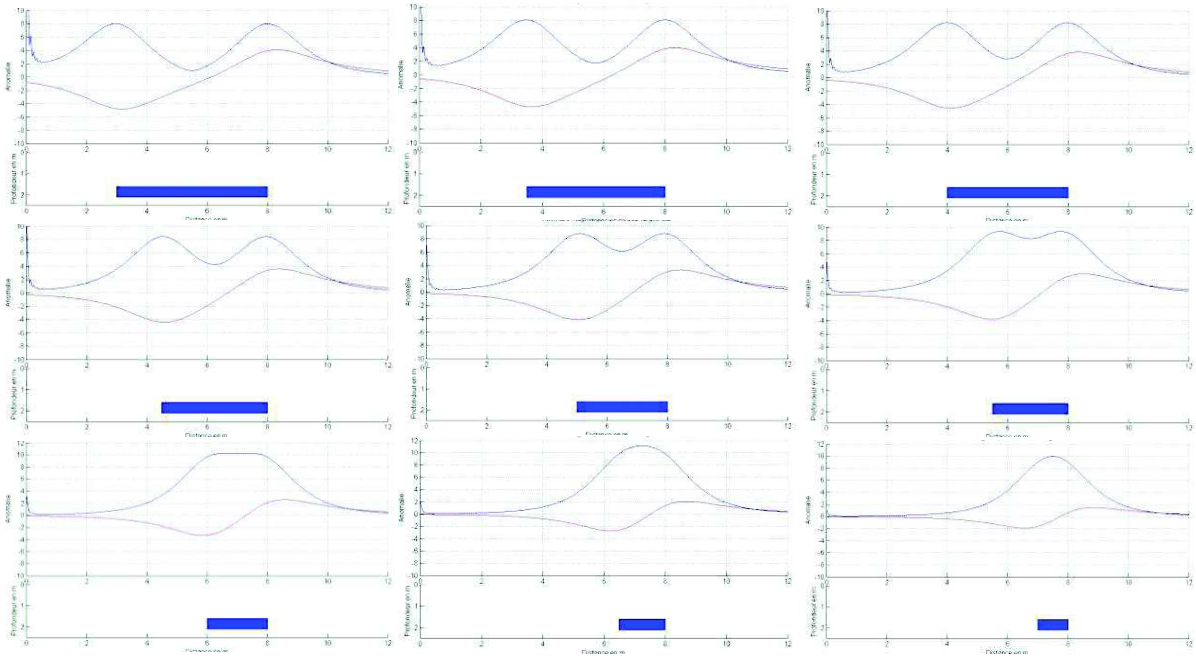


Figure 4.31 ***module du signal analytique à différents ordre (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 et 3) pour un modèle de 5 m de large à 1.6 m de profondeur.***

Les deux maxima sont bien séparés dès l'ordre 1 et la demi-largeur donne bien la profondeur de l'objet.

Si on réduit la largeur de l'objet, les deux maxima du module du signal analytique vont progressivement fusionner. Pour l'ordre 2, on observe que l'on perd le double maximum pour une largeur inférieure à 2,5 m (Figure 4.32).



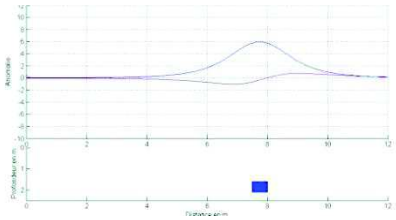


Figure 4.32 ***Module du signal analytique d'ordre 2 pour une structure à 1.6 m de profondeur et dont la largeur diminue.***

Enfin, on applique la transformée à notre cas synthétique de la fouille du secteur 6 d'Al-Rawda (Figure 4.33).

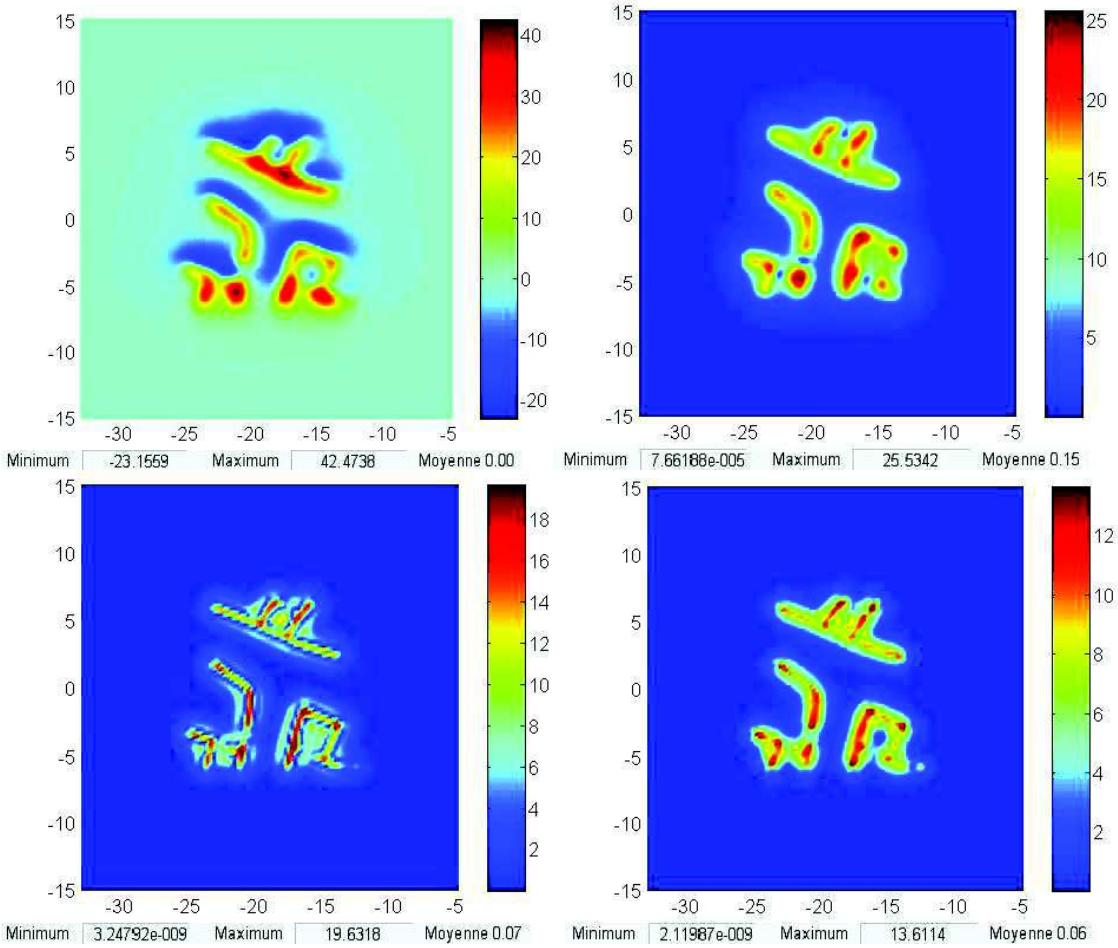


Figure 4.33 ***carte d'anomalie magnétique du cas synthétique de la fouille du secteur 6 d'Al-Rawda et module du signal analytique d'ordre 1, 2 et 3.***

14.5. La transformée tilt-angle

La méthode de tilt-angle est une autre méthode simple d'estimation de la profondeur des sources à partir de la transformation d'une carte d'anomalie magnétique. Les contours de la carte de tilt-angle donnent une visualisation directe de la profondeur. L'autre avantage est que la transformée met à peu près à la même valeur l'effet des sources, qu'elles produisent de fortes anomalies ou non. Cet avantage n'existe pas avec le signal analytique. La méthode a été proposée par Miller et Singh (2004) avant d'être affinée par Verduzco et al. (2004) et l'équation actuellement utilisée est (Salem et al., 2007, 2008)

$$\theta = tan^{-1} \frac{\frac{\delta M}{\delta z}}{\sqrt{\left(\frac{\delta M}{\delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta M}{\delta y}\right)^2}} \qquad (52)$$

avec $M(x, y)$ la carte d'anomalie magnétique double réduite au pôle.

Etant donné que l'on a une fonction de type inverse-tangente, toutes les anomalies magnétiques seront transformées en signaux d'amplitude du même type. Les anomalies de forte amplitude ne sont plus prépondérantes par rapport aux anomalies de faible amplitude sur une carte dessinée en couleur.

Pour une structure de type de celle de Nabighian (1972) avec un contact vertical et un champ magnétique réduit au pôle, le tilt angle est simplement égal à

$$\theta = tan^{-1} \frac{h}{z_c}$$

avec h la localisation horizontale du contact et z_c sa profondeur. A l'aplomb du contact, le tilt angle est égal à zéro et la distance entre les tilts angle égaux à zéro et plus ou moins à 45° est égale à la profondeur du contact (Figure 4.34). Le cas synthétique de la figure 4.35 proposé par Salem et al. (2007) montre un très bon résultat.

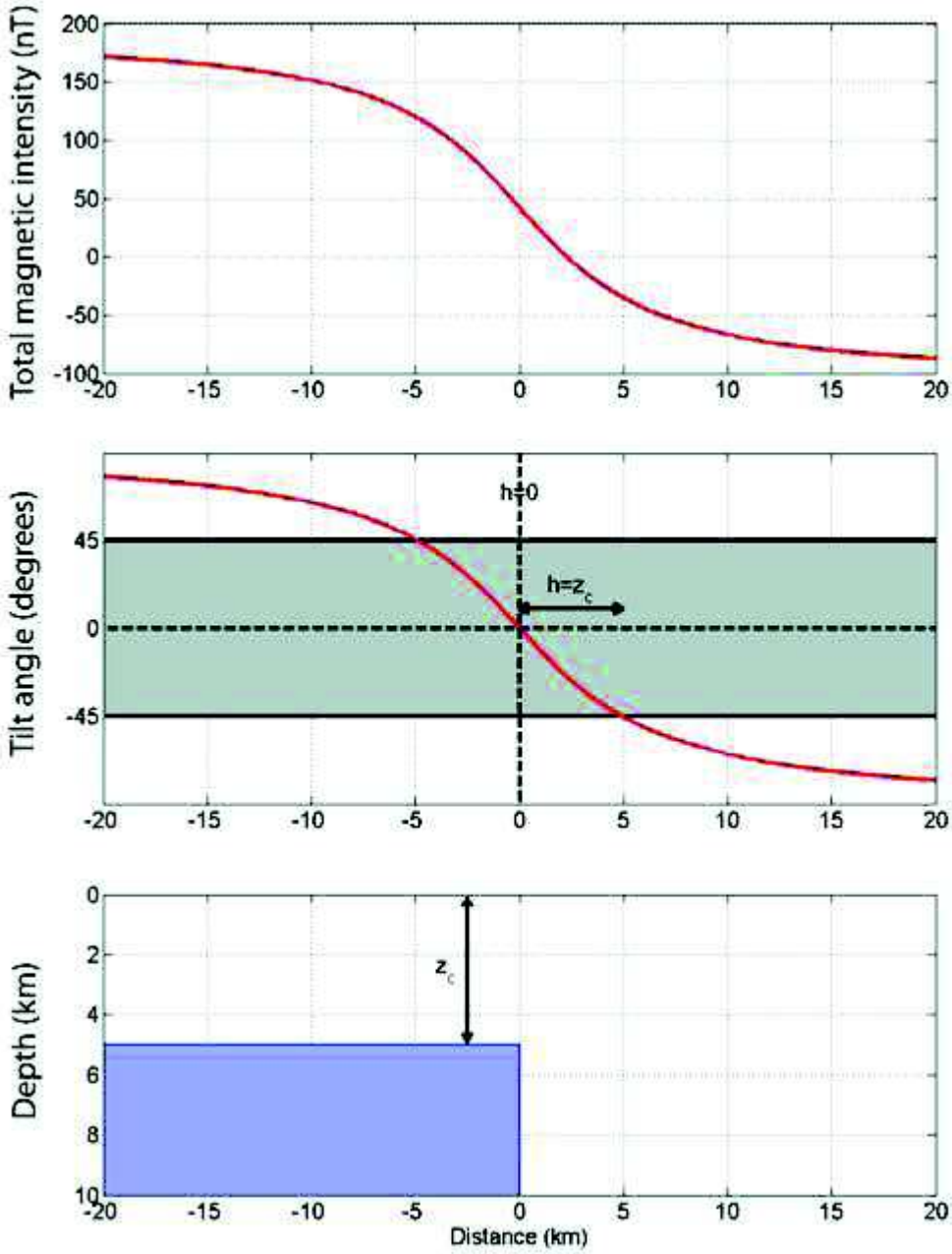


Figure 4.34 ***profil synthétique de l'anomalie magnétique (en haut) et du tilt angle (au milieu) obtenu pour un contact vertical (en bas) à une profondeur z_c. Le contact coïncide avec la valeur zéro du tilt angle et la zone du tilt angle comprise entre -45° et 45° est indiquée en grisé (Salem et al., 2007).***

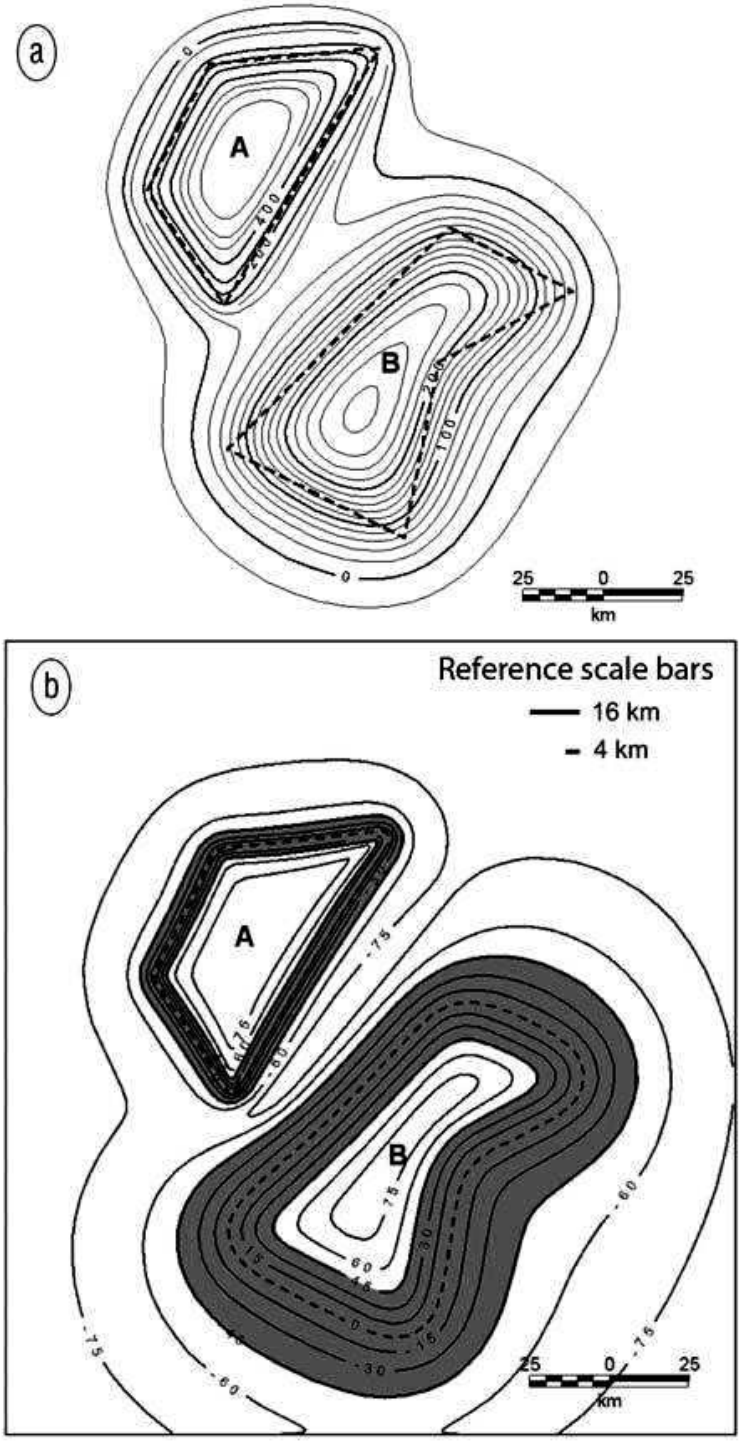


Figure 4.35 ***Anomalie magnétique synthétique obtenue pour deux structures aimantées en champ magnétique vertical. La structure du haut est à une profondeur de 4 km et celle du bas à une profondeur de 16 km. La carte du haut est la carte d'anomalie magnétique et la carte du bas est la carte du tilt angle avec la courbe 0° indiquée en tirets (Salem et al., 2007).***

On a calculé le tilt- angle d'ordres 1 et 2 pour le cas synthétique habituel (rectangle de 2 m de largeur et 3 m de longueur) pour différentes profondeurs (Figure 4. 36).

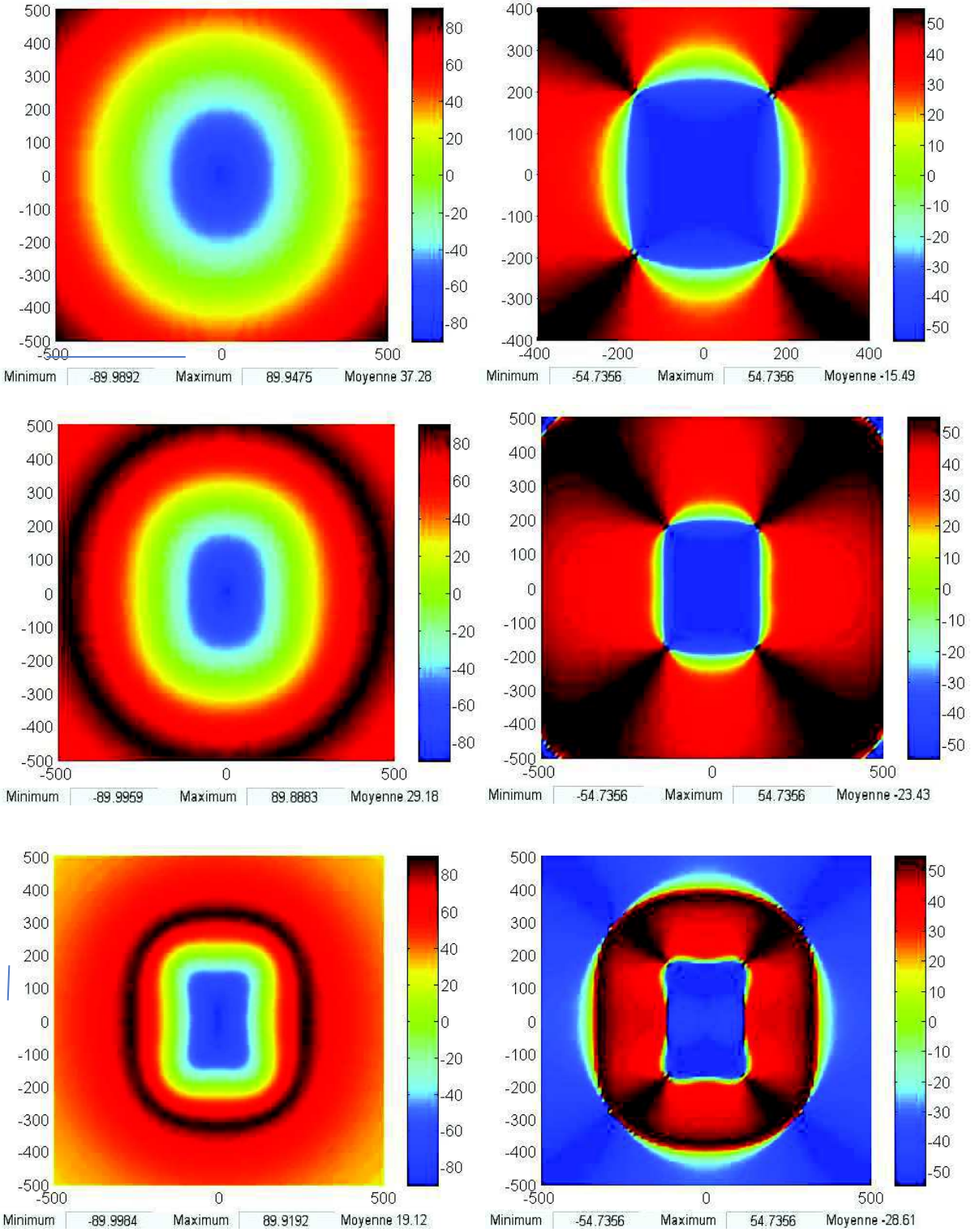


Figure 4.36 ***Cartes de tilt-angle d'ordre 1 à gauche et d'ordre 2 à droite pour le cas synthétique à des profondeurs de 3, 2 et 1 m. Les échelles horizontales sont en centimètres.***

La courbe 0° correspond à la couleur verte dans la carte de tilt angle. Pour la structure à 3 m de profondeur, on remarque que cette courbe est arrondie et correspond mal à la structure qui est la source de l'anomalie. La profondeur correspond à la distance entre les deux courbes$\pm 45°$ et dans ce cas la distance est de 2,2 m au lieu de 3 m. Pour la structure à

2 m de profondeur, le courbe 0 est plus ovale, la distance entre les deux courbes $\pm 45°$ est de 1,3 m au lieu de 2 m. Pour le troisième cas, une structure à 1 m de profondeur , la courbe 0 est assez rectangulaire correspondant bien avec la structure. La distance entre les deux courbes $\pm 45°$ correspond bien à la profondeur. Par contre, le tilt angle d'ordre 2 ne donne aucun résultat intéressant.

Enfin, on a calculé le tilt-angle pour notre cas synthétique du secteur 6 des fouilles d'Al-Rawda. La courbe 0° délimite très bien le bord des structures aimantées. La profondeur obtenue est de l'ordre de 1 m au lieu de 2 m. Cela est dû au fait que le modèle ne correspond pas à une demi-plaque nous avons en fait des zones aimantées assez étroites. Ce problème a été étudié par Bouiflane (2008). Il a montré que pour une plaque mince, il faut appliquer un coefficient égal à 0,4, ce qui fait que la profondeur calculée est semblable à celle du modèle.

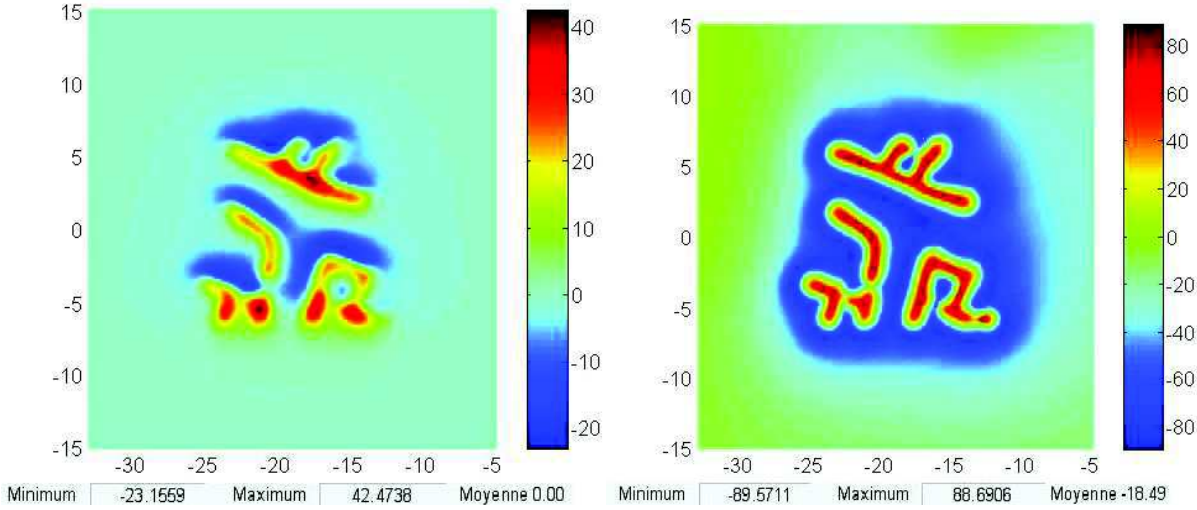


Figure 4.37 ***Carte d'anomalie magnétique pour le cas synthétique des fouilles du secteur 6 d'Al-Rawda à gauche et carte du tilt angle d'ordre 1 à droite.***

15. Conclusion

Dans ce chapitre on a calculé l'anomalie magnétique qui résulte d'une barre infinie et on a trouvé que l'anomalie magnétique a toujours trois extrema et non deux. Le troisième extrema pourrait être à l'infini .On a trouvé aussi que la distance entre les trois extrema est proportionnelle à la profondeur, et la pente varie entre $\frac{2}{\sqrt{3}}$ pour I_T = 45° modulo 180° et $\sqrt{3}$ pour I_T = 90° modulo 180°

Pour obtenir une carte magnétique plus haute résolution qui nous donne plus d'informations sur la géométrie des structures, on a appliqué tous les opérateurs sur deux cas synthétiques, le premier cas pour une structure rectangulaire de 2 m de largeur et 3 m de longueur, et le deuxième cas basé sur le plan de fouille du secteur 6 effectuée sur le site

Al-Rawda. On a trouvé que l'opérateur de double réduction au pôle rend l'anomalie magnétique symétrique.

Pour l'opérateur de la dérivation verticale on a conclu qu'avec l'augmentation de l'ordre de la dérivation on peut voir mieux la géométrie de la structure. On peut utiliser cet opérateur pour définir la largeur de structure si elle est plus large que profonde. On a trouvé également que s'il y a deux structures assez proches et si la distance entre les deux structures est inférieure à la profondeur, l'anomalie magnétique correspond plutôt à celle d'une seule structure.

L'application de l'opérateur de prolongement vers le haut fait diminuer le signal haute fréquence beaucoup plus rapidement que celui basse fréquence. L'opérateur de prolongement vers le bas aura l'effet inverse, mais on atteint assez rapidement une limite liées au rapport signal sur bruit.

Un autre opérateur utilisé est le signal analytique. Cet opérateur est un bon outil pour localiser les sources magnétiques et définir leur profondeur. Concernant la méthode de tilt-angle on a constaté que cet opérateur n'est pas toujours performant pour définir la profondeur, cela dépendant de la géométrie de la structure.

Chapitre5: interprétation des données magnétiques et modélisation

Chapitre5: interprétation des données magnétiques et modélisation 207
Chapitre5: interprétation des données magnétiques et modélisation 208
1. Application des opérateurs de transformation de cartes 208
1.1. La réduction au pôle 208
1.2. La dérivation verticale 213
1.3. Les prolongements 219
1.3.1. Prolongement vers le haut 219
1.3.2. Prolongement vers le bas 222
1.4. Le signal analytique 225
1.5. Le tilt angle 230
2. Interprétations à partir de la carte de dérivée d'ordre 1.5 233
2.1. Al-Rawda 233
2.2. Sh'airat 245
2.3. Malhat Ed-Deru 255
3. Comparaison des cartes de champ magnétique avec la gradiométrie 262
4. La modélisation 264
4.1. Modélisation de rues à Al-Rawda 264
4.2. Modalisation de fossés à Al-Rawda 269
4.3. Modélisation de rues à Sh'airat 271
5. Conclusion 271

Chapitre5: interprétation des données magnétiques et modélisation

Ce dernier chapitre contient les interprétations des données sur les trois sites.

Dans un premier temps on va appliquer les opérateurs décrits dans les bases théoriques du chapitre précédent. L'objectif est obtenir des cartes avec de meilleures résolutions pour obtenir le maximum d'informations sur la géométrie des sources qui sont à l'origine des anomalies observées.

On modélise également les données soit en faisant l'hypothèse en deux dimensions qui rend les calculs plus simples, soit en trois dimensions.

16. Application des opérateurs de transformation de cartes

16.1. La réduction au pôle

On a vu dans le chapitre précèdent que l'anomalie magnétique dépend de la direction du champ régional et de la direction de l'aimantation. L'opérateur double réduction au pôle met le maximum de l'anomalie à l'aplomb des sources à condition que l'aimantation soit induite, ou bien que si elle est rémanente, elle soit dans la direction du champ magnétique régional.

On a calculé la double réduction au pôle pour les trois sites en supposant que l'aimantation est induite. La direction du champ magnétique régional est celle déduite de L'IGRF 2010 : dans la compilation des données, on a perdu l'information sur l'époque de la mesure qui est au pire 2003, mais la direction de l'IGRF a peu changé sur une telle durée et cela n'a donc pas de conséquence sur la carte transformée.

Pour chacun des trois sites, on montre la carte d'anomalie magnétique et la carte de double réduction au pôle (Figure 5.1 pour Al-Rawda, 5.2 pour Sh'airat et 5.3 Malhat Ed-Deru). Afin de mieux voir l'effet des transformées, on montre également des zooms sur certaines parties des cartes. En général pour les trois sites on remarque que l'anomalie magnétique plus symétrique dans la carte double réduction au pôle.

Sur la carte d'anomalie double réduit au pôle de tell Al-Rawda on voit mieux le fossé (Figure 5.1 a et b). Par ailleurs, dans la zone centrale, on remarque que l'anomalie

magnétique sur la carte double réduite au pôle est plus marquée et symétrique on voit mieux la rue circulaire C1. La rue radiale R1 apparaît plus étroite. et le maximum de l'anomalie magnétique est mieux centré par rapport à la carte brute (Figure 5.1 c et d). Sur la carte double réduite au pôle de tell Sh'airat, la rue qui entoure la zone centrale (Figure 5.2 a et b) et les structures dans la zone Est (Figure 5.2 c et d) apparaissent mieux et les lignes apparaissent plus détaillées. Enfin, on fait le même type de remarque pour la carte de Malhat Ed-Deru (Figure 5.3).

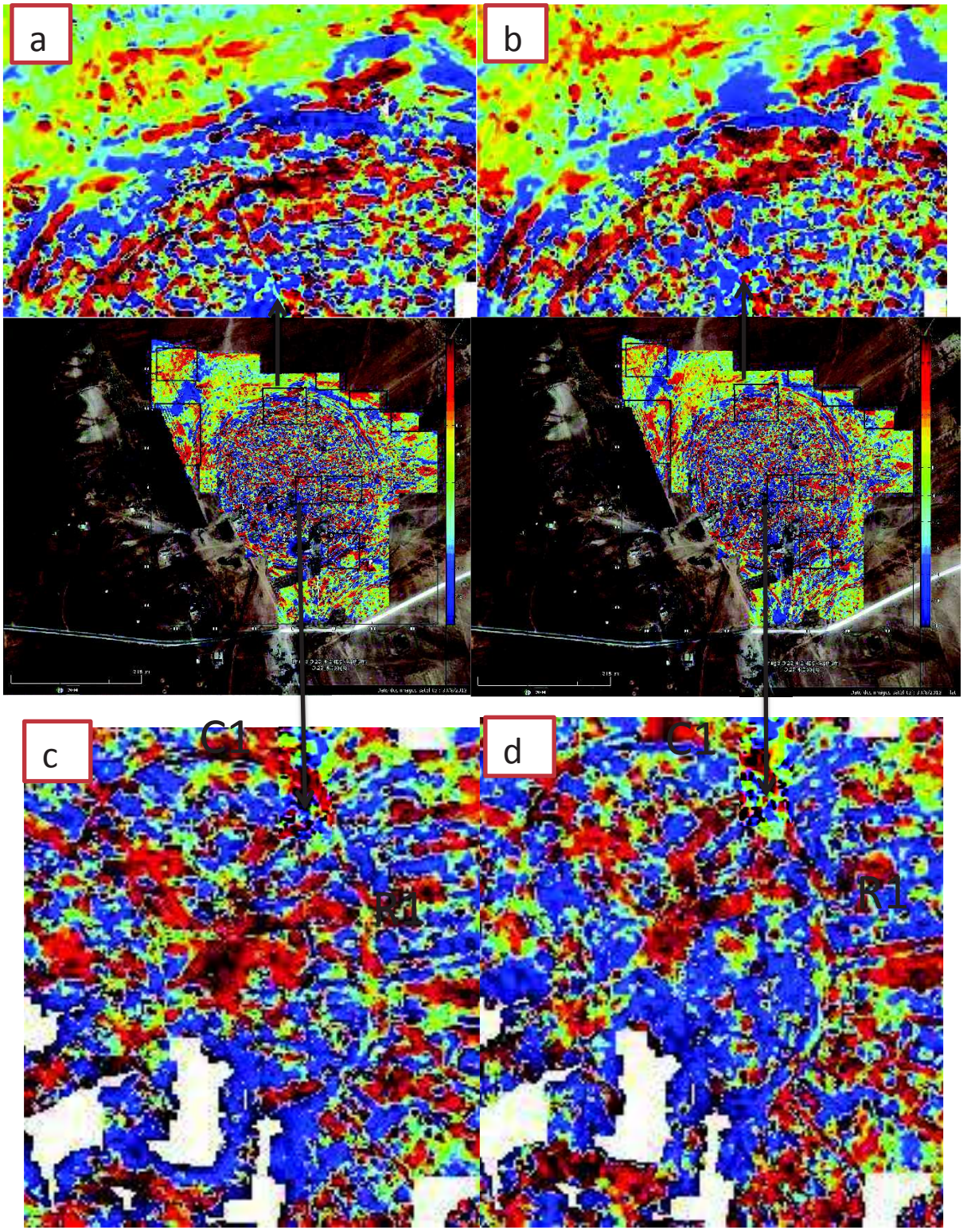


Figure 5.1 ***cartes d'anomalie magnétique de tell Al-Rawda à gauche et cartes double réduite au pôle à droite, a: zoom sur le fossé au nord de la carte brute, b :zoom sur le fossé au nord de la carte double réduction au pôle,c: zoom de la zone centrale de la carte brute,d :zoom de la zone centrale de la carte double réduction au pôle.***

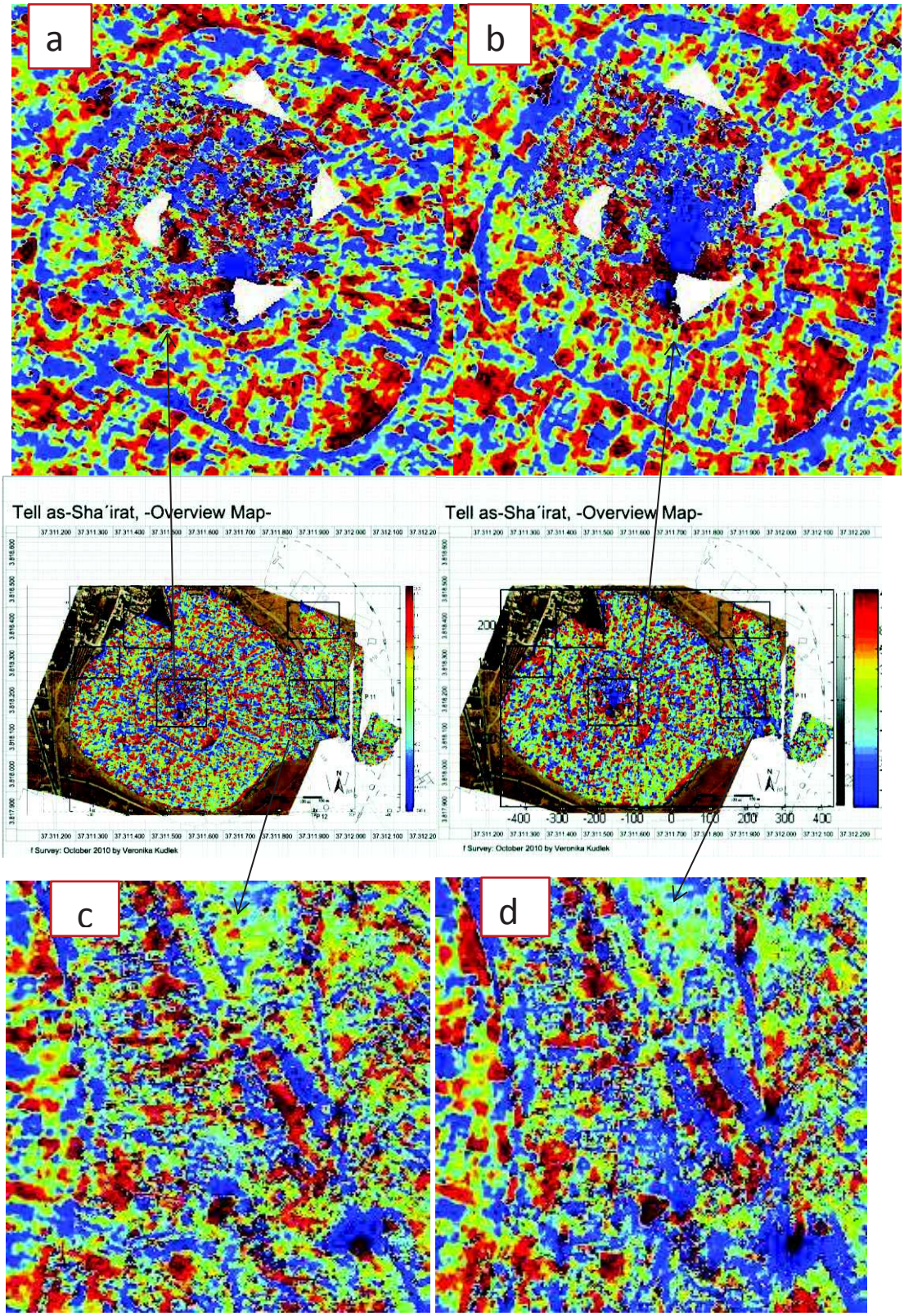


Figure 5.2 ***cartes d'anomalie magnétique de Tell Sh'airat à gauche et carte double réduite au pôle à droite,a : zoom de la zone centrale de la carte brute,b : zoom de la zone centrale (sur la carte double réduite au pôle on voit mieux la rue qui entoure cette zone),c: zoom sur la zonne est de la carte brute, d: zoom de la même zone de la carte double réduction au pôle.***

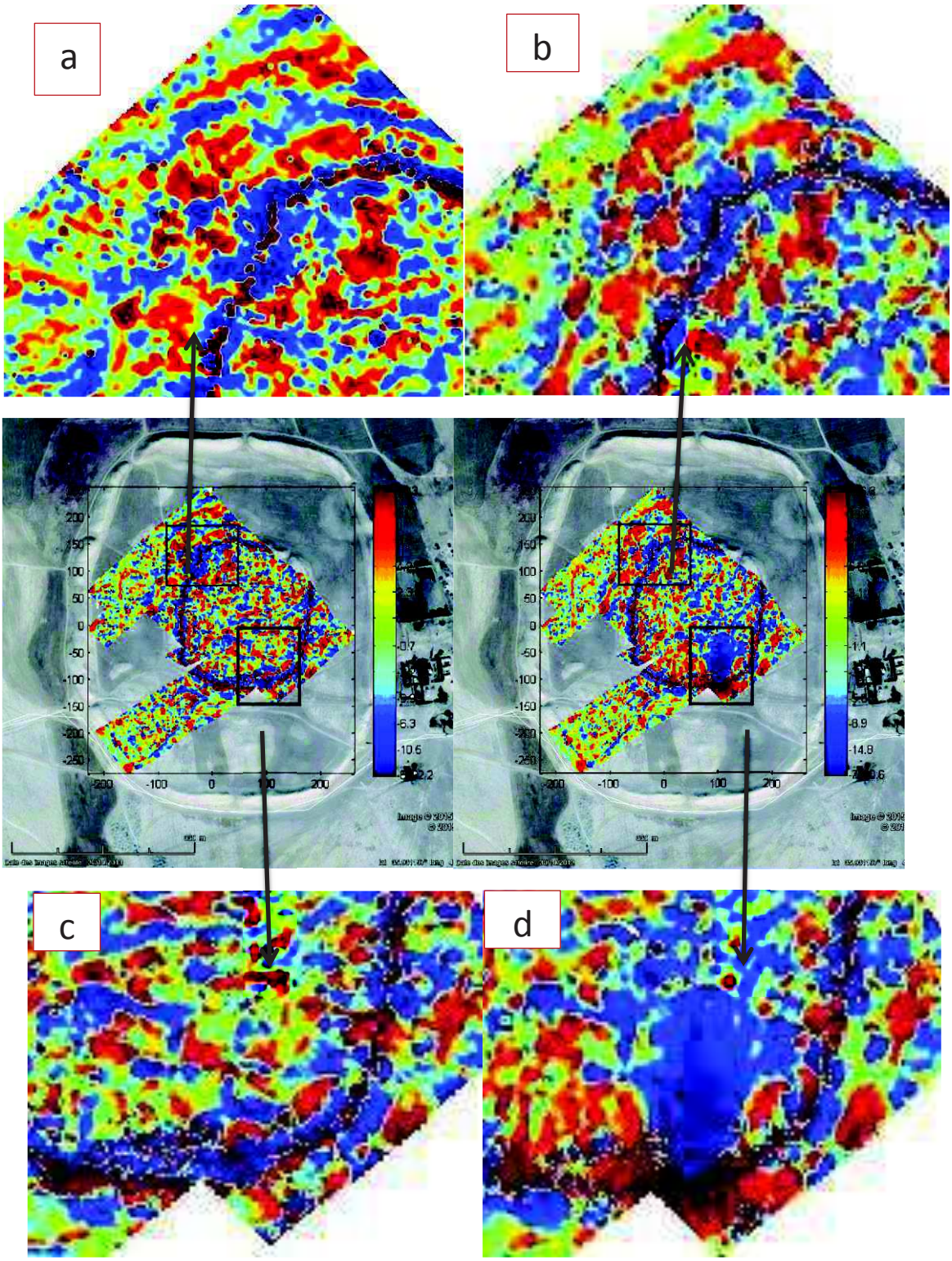


Figure 5.3 ***cartes d'anomalie magnétique de tell Malhat Ed-Deru à gauche et cartes double réduite au pôle à droite,a: zoom sur la partie nord-est du rempart extrait de la carte brute,b: zoom de la même zone de la carte double réduite au pôle, c: zoom sur la zone sud-est de la carte brute,d: zoom sur la même zone de la carte double réduction au pôle.***

16.2. La dérivation verticale

L'effet de la dérivée verticale est d'affaiblir les anomalies magnétiques basses fréquences, ce qui permet de mieux mettre en évidence les anomalies les plus proches de la de surface tout en les rendant plus haute fréquence. Par contre, le bruit haut fréquence augmente aussi, cela dépendant de la qualité des données.

On a appliqué l'opérateur de dérivée verticale de différents ordres sur les cartes des trois sites. En général, les archéologues préfèrent travailler sur la visualisation en noir et blanc de ces cartes plutôt qu'en couleur (Figures 5.4, 5 :5 et 5.6). Plus précisément, on calcule d'abord la double réduite au pôle et ensuite les dérivées. Cela est un avantage certain par rapport aux cartes de données en gradiométrie puisque la distorsion des anomalies magnétiques est à priori supprimée.

Avec l'augmentation de l'ordre de dérivation, les rues radiales et les rues circulaires apparaissent de plus en plus clairement ainsi que d'autres structures difficiles à reconnaitre sur la carte d'anomalie. En même temps, même si les cartes deviennent de plus en plus fines avec l'ordre de dérivation, le bruit haute fréquence augmente aussi, en particulier pour Sh'airat. Le meilleur résultat obtenu est la carte de dérivée d'ordre 1.5.

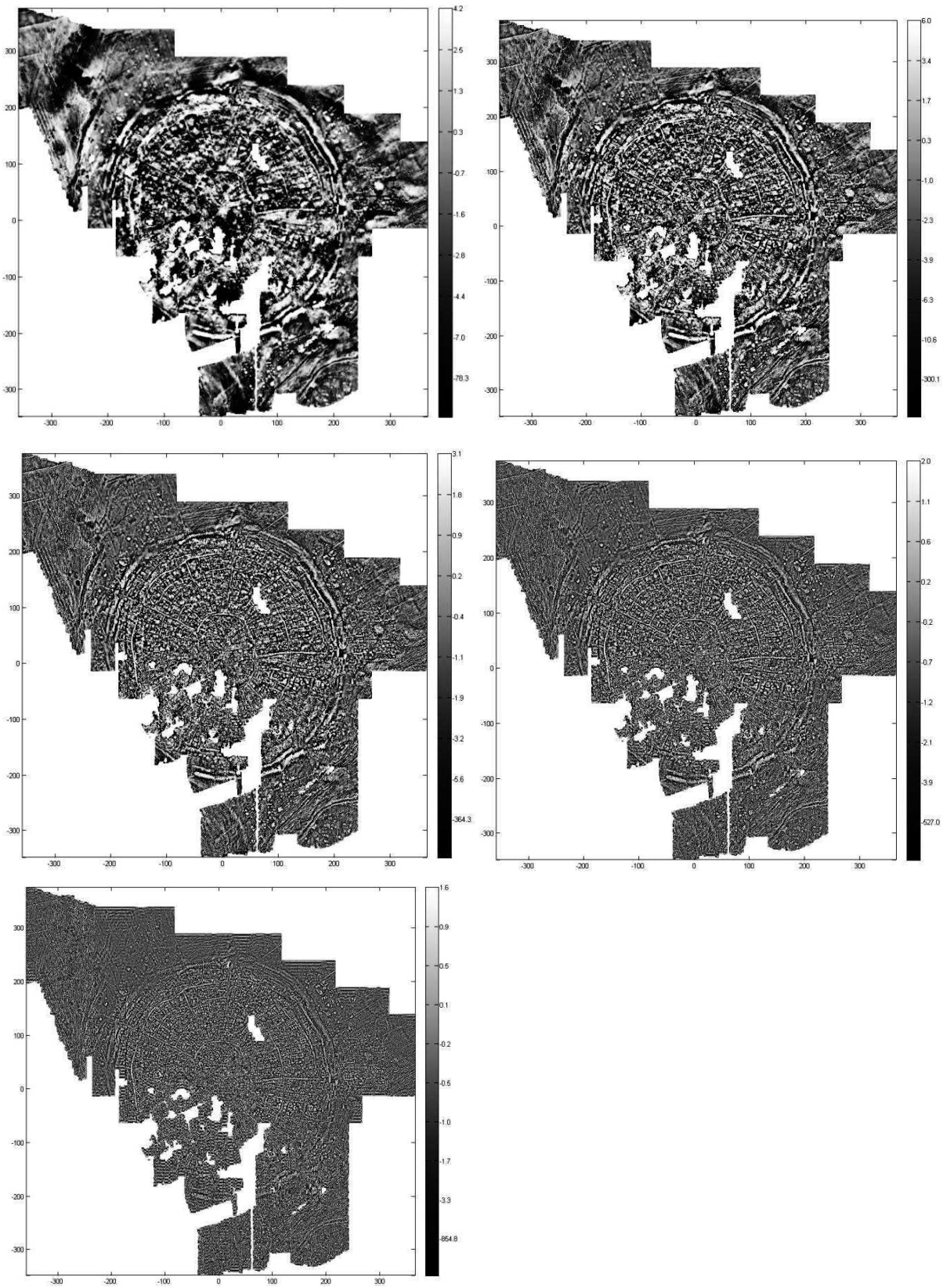


Figure 5.4 ***cartes d'anomalie magnétique de tell Al-Rawda réduite au pôle en haut à gauche et cartes de dérivée verticale d'ordre 0,5, 1, 1,5 et 2 respectivement.***

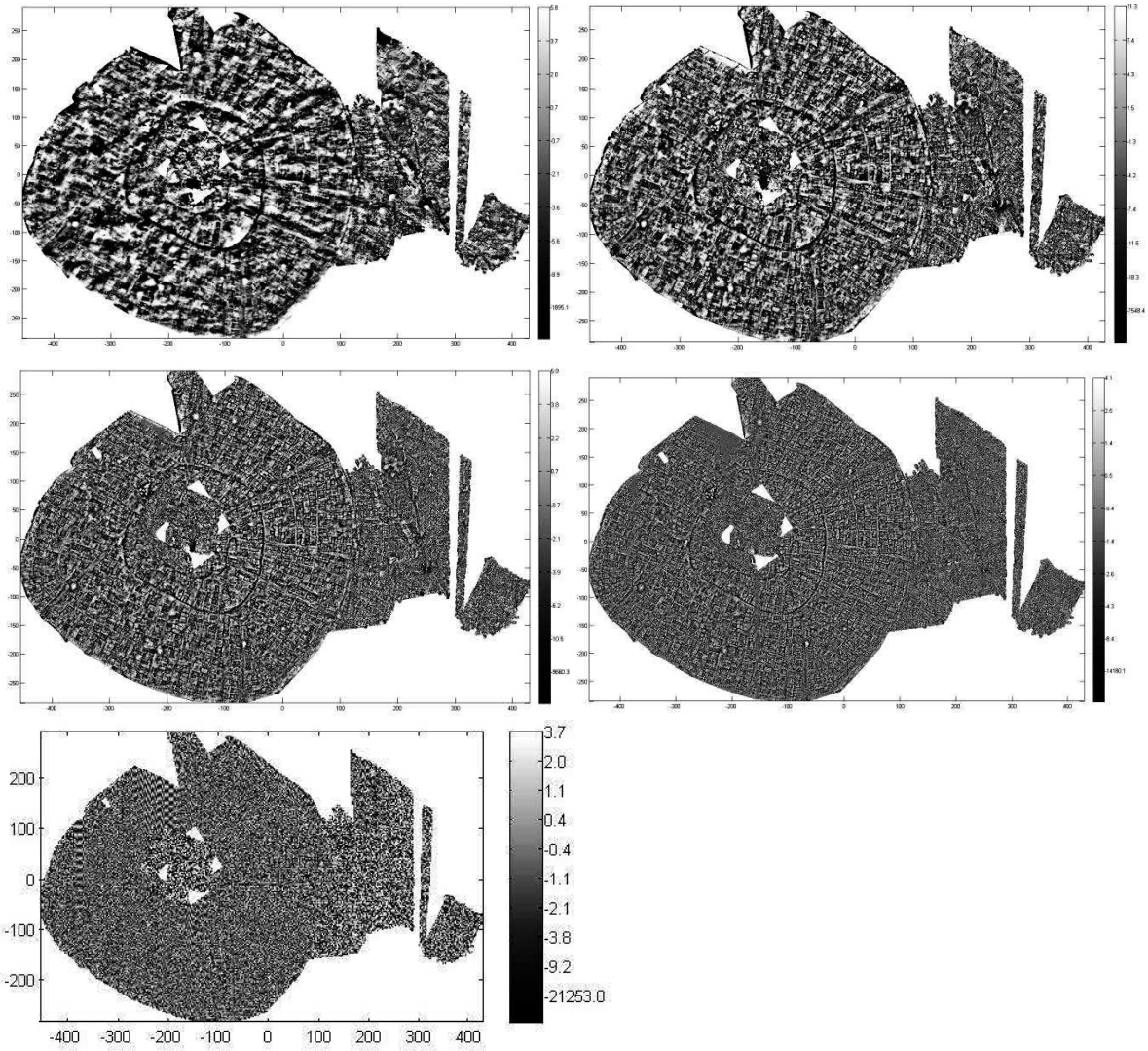


Figure 5.5 ***carte d'anomalie magnétique réduite au pôle de Tell Sh'airat en haut à gauche et cartes de dérivée verticale d'ordre 0,5, 1, 1,5 et 2.***

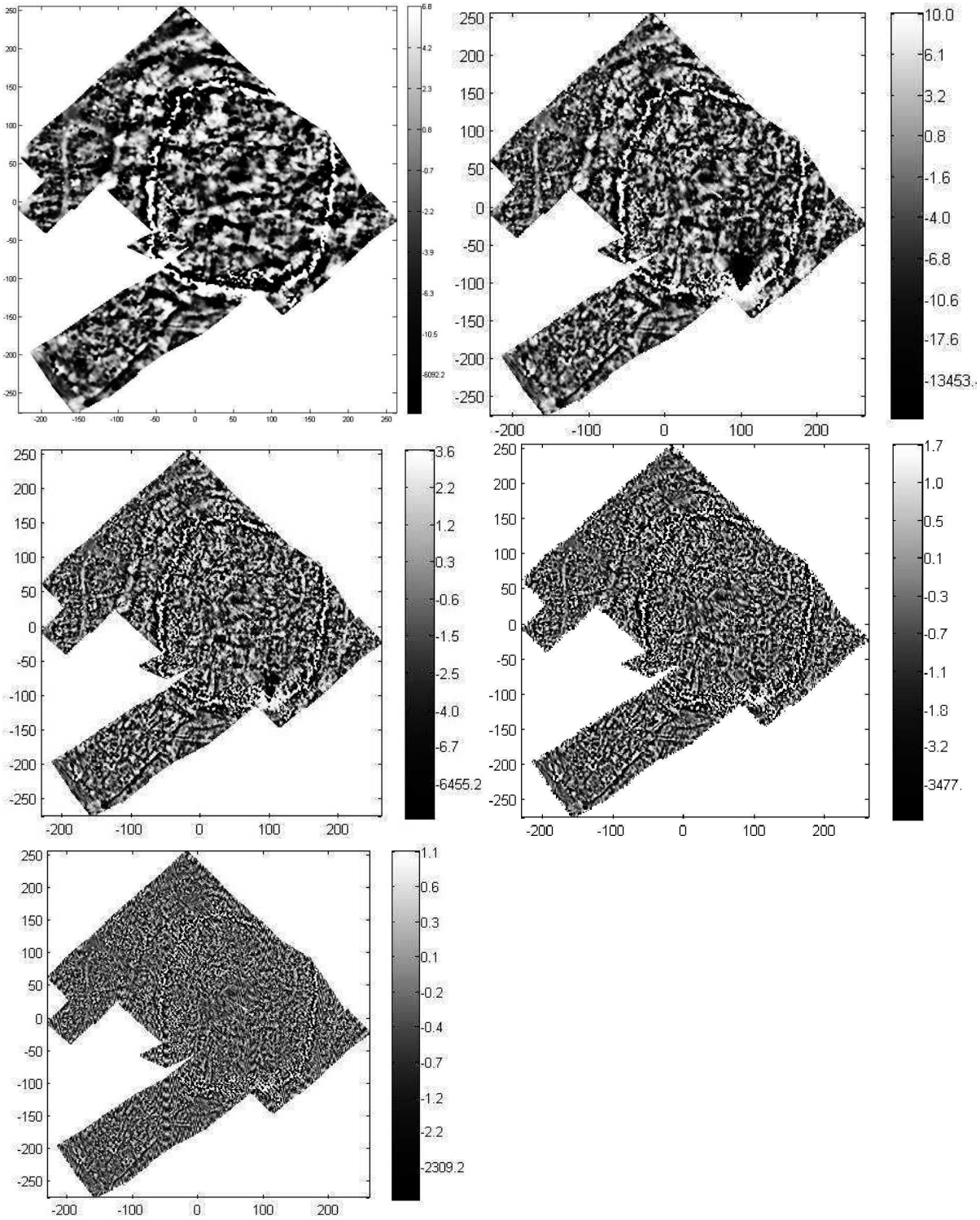
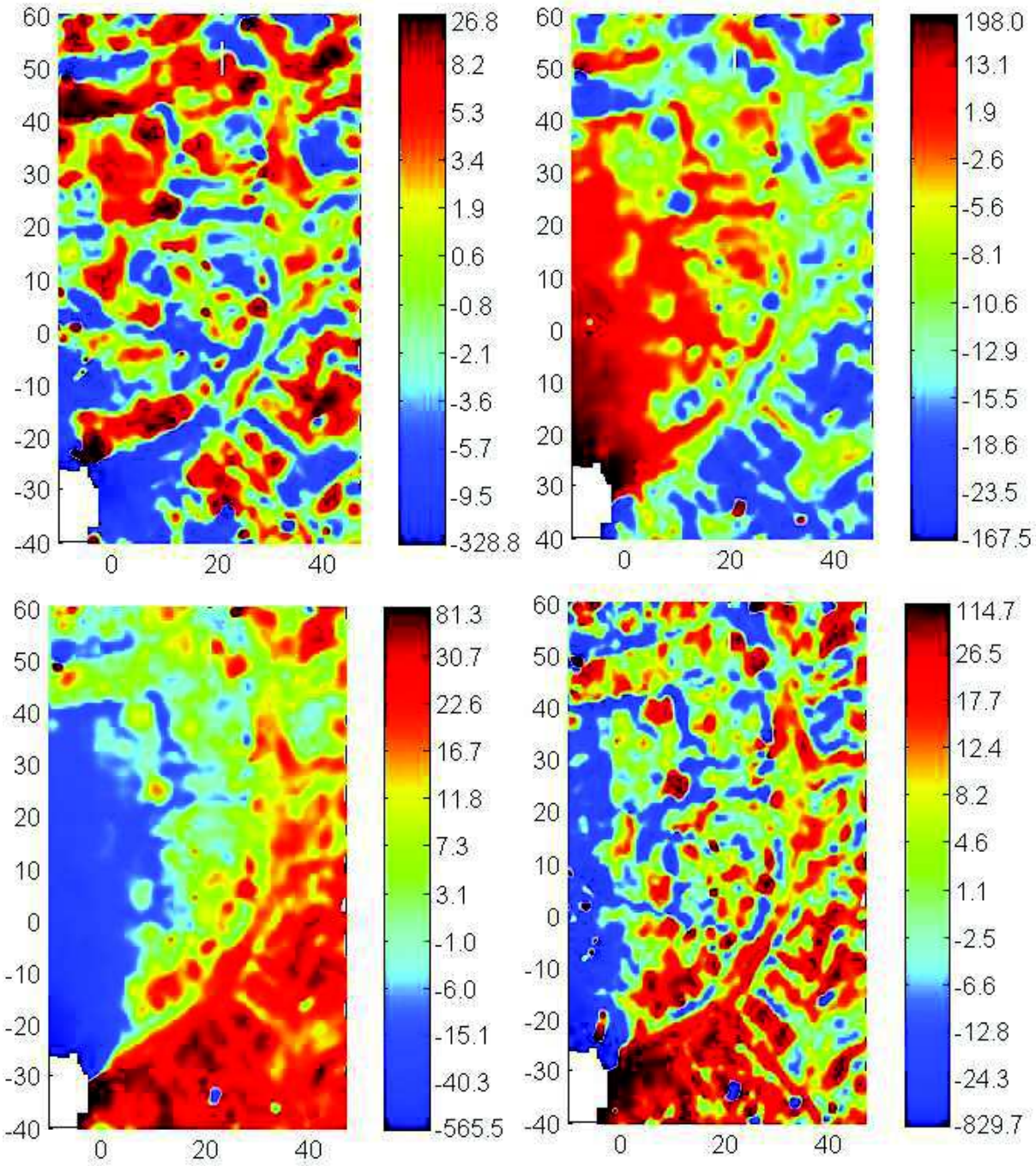


Figure 5.6 ***carte d'anomalie magnétique réduite au pôle de tell Malhat Ed-Deru en haut à gauche et cartes de dérivée verticale d'ordre 0,5, 1, 1,5 et 2.***

On a vu dans le chapitre précèdent avec un cas synthétique qu'à partir de la carte de dérivée verticale on peut définir la largeur des structures à condition que leur largeur soit suffisante par rapport à leur profondeur. Cela est appliqué pour la zone centrale d'Al-Rawda en prenant uniquement les données de l'EOST. Cette zone contient des rues radiales étroites et une rue circulaire plus large. À partir de la carte magnétique, on calcule successivement la simple réduction au pôle puis la double puis on applique la dérivée verticale aux ordres 0,5 à 2,5 avec un pas de 0,5 (Figure 5.7).



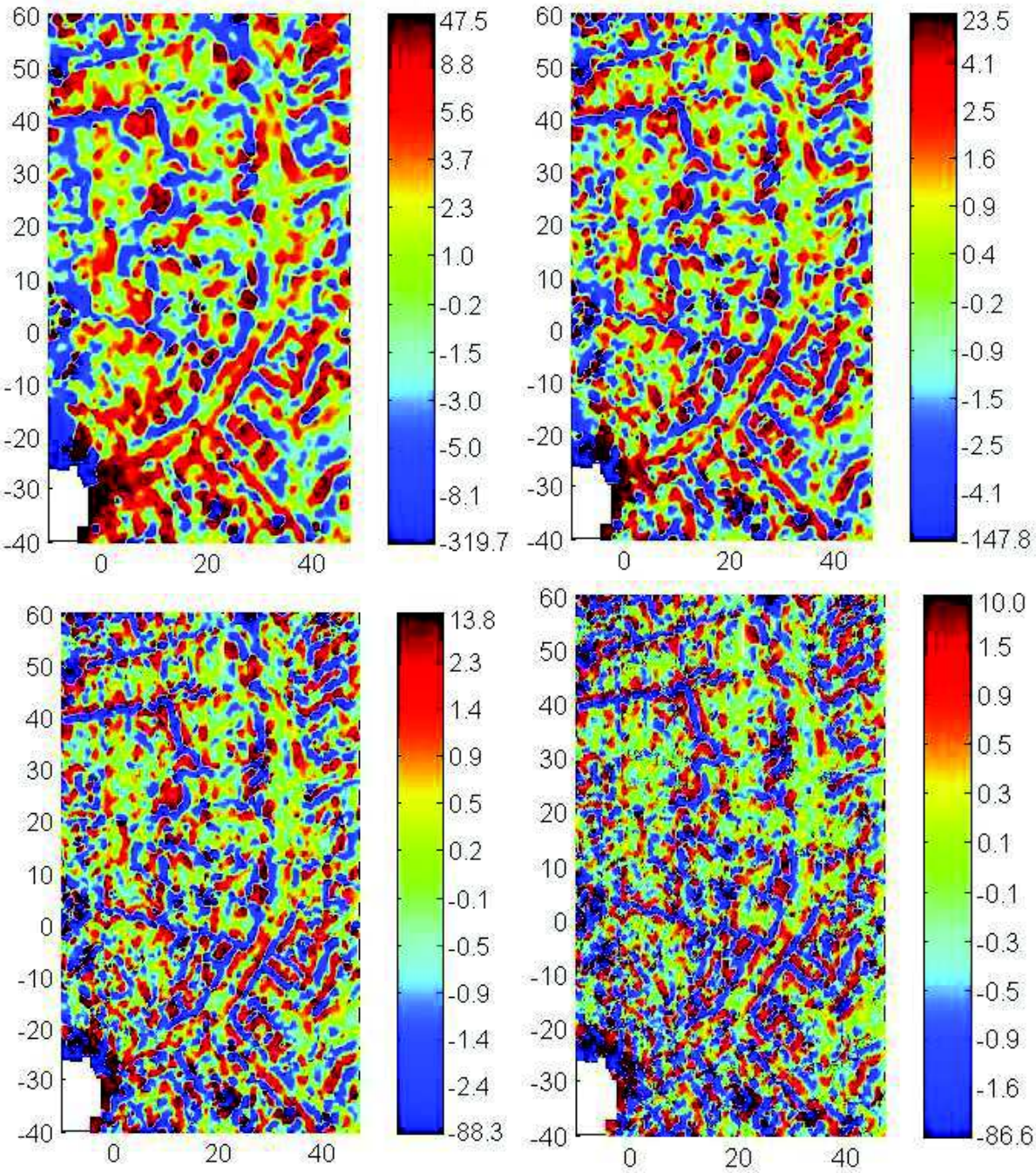


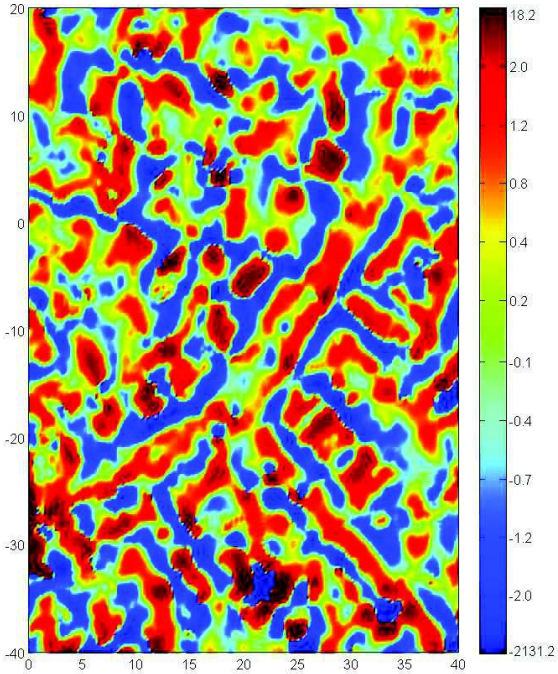
Figure 5.7 ***carte d'anomalie magnétique, simple réduction au pôle, double réduction au pôle et dérivées verticales d'ordre 0,5, 1, 1,5, 2 et 2.5.***

On observe qu'à partir de l'ordre 1, on peut commencer à définir la largeur de la rue circulaire, qui est d'environ 3,5 m. Par contre on ne peut pas définir aussi facilement les largeurs des autres rues. Pour certaines d'entre elles et avec l'ordre de dérivation à 2 ou 2.5 on commence à pouvoir observer les deux maxima ce qui donne une largeur maximale de

1,5 m. On remarque aussi que jusqu'à l'ordre 2,5 le rapport signal sur bruit ne se dégrade pas, par contre la carte dérivation verticale d'ordre 3 montre un bruit important.

On peut aussi comparer nos données avec les données de laboratoire de recherche de Lyon. On a prend une région commune dans la zone centrale et on applique l'opérateur de dérivation verticale d'ordre 2, (Figure 5.8). On voit bien qu'il n'y a pas de bruit. Pour les données de l'université de Lyon pour le capteur haut l'application de l'opérateur d'ordre 2 donne de très mauvais résultats et l'opérateur d'ordre 1.5 est donné à la figure 5.8, à droite. On remarque qu'il y a toujours beaucoup de bruit, donc la qualité de nos données est meilleure, ce qui est en particulier dû au fait que l'espacement de nos profils est de 0,5 m au lieu de 1m.

Données l'EOST



Données Gondet

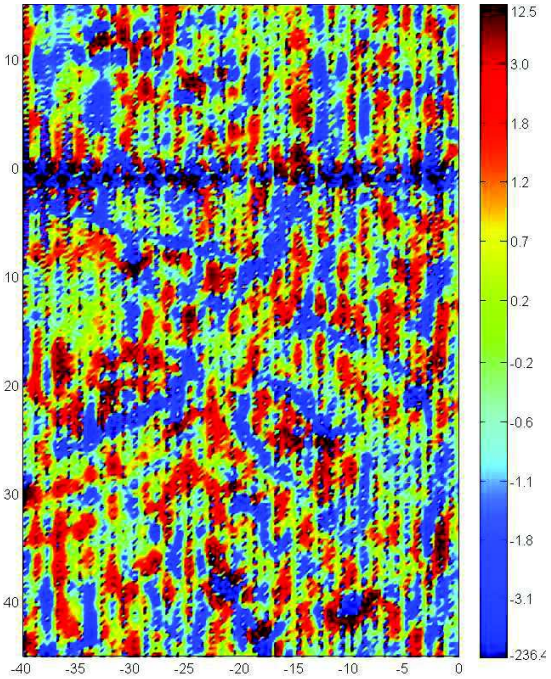


Figure 5.8 ***Carte de dérivée verticale d'ordre 2 de la zone centrale (données l'Eost) à gauche. Carte de dérivée verticale d'ordre 1.5 de la zone centrale (donnés laboratoire de recherche de Lyon) à droite.***

16.3. Les prolongements

16.3.1. Prolongement vers le haut

L'opérateur de prolongement vers le haut conduit à favoriser les structures profondes par rapport à celles de proche surface. Souvent, les structures archéologiques se situent proche de la surface et donc l'opérateur de prolongement vers le haut va les atténuer ainsi que le bruit haute fréquence. On a appliqué l'opérateur le prolongement vers le haut à 1, 2 et 3 m. On remarque qu'avec l'augmentation de l'altitude du prolongement, des anomalies

magnétiques basse fréquence apparaissent ce qui pourrait correspondre à des variations lithologiques à grande échelle. (Figure 5.9, 5.10 et 5.11)

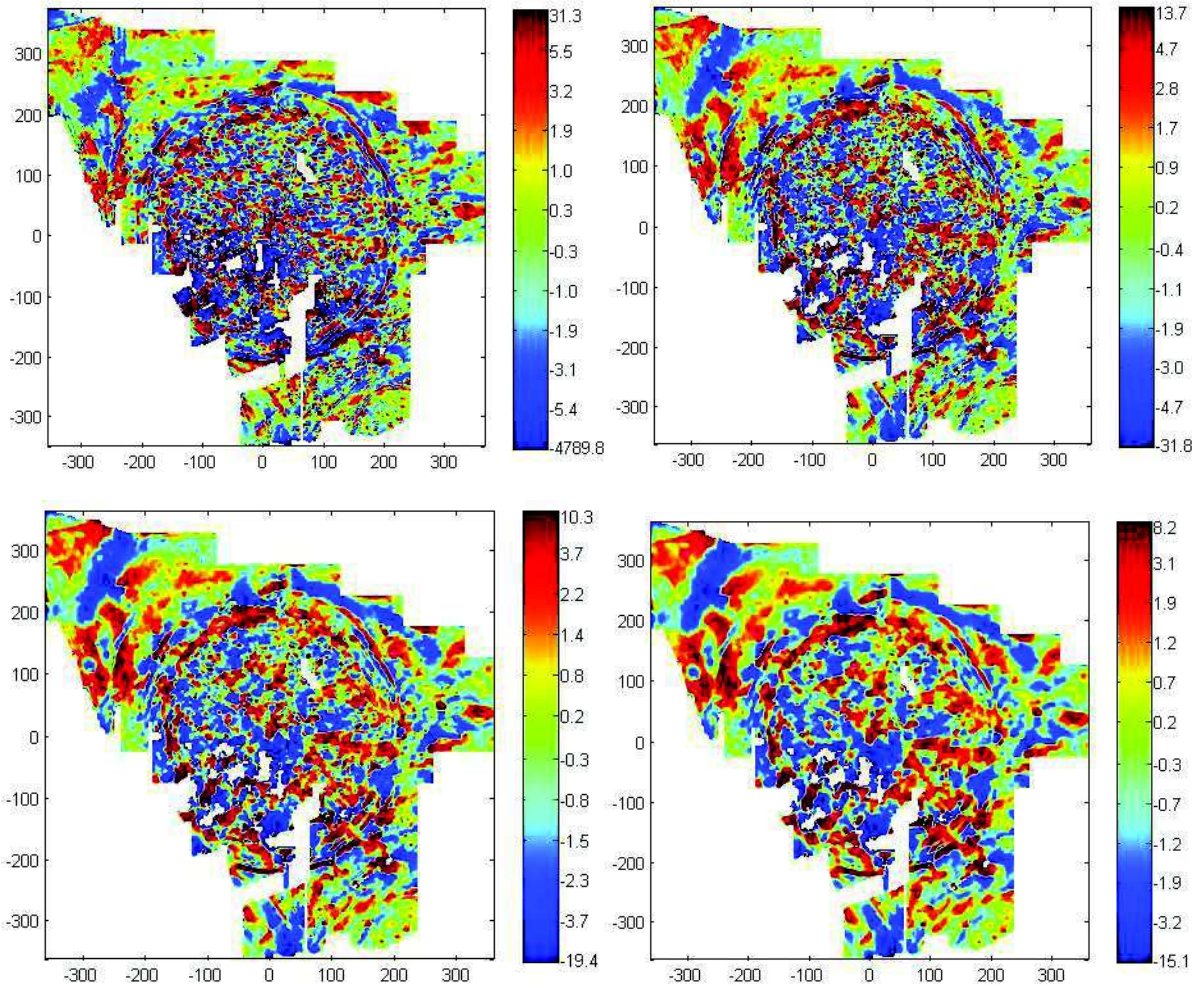


Figure 5.9 ***carte d'anomalie magnétique d'Al-Rawda à gauche en haut et prolongements vers le haut à 1, 2 et 3 m, apparition de structures à grande longueur d'onde avec l'augmentation du prolongement vers le haut.***

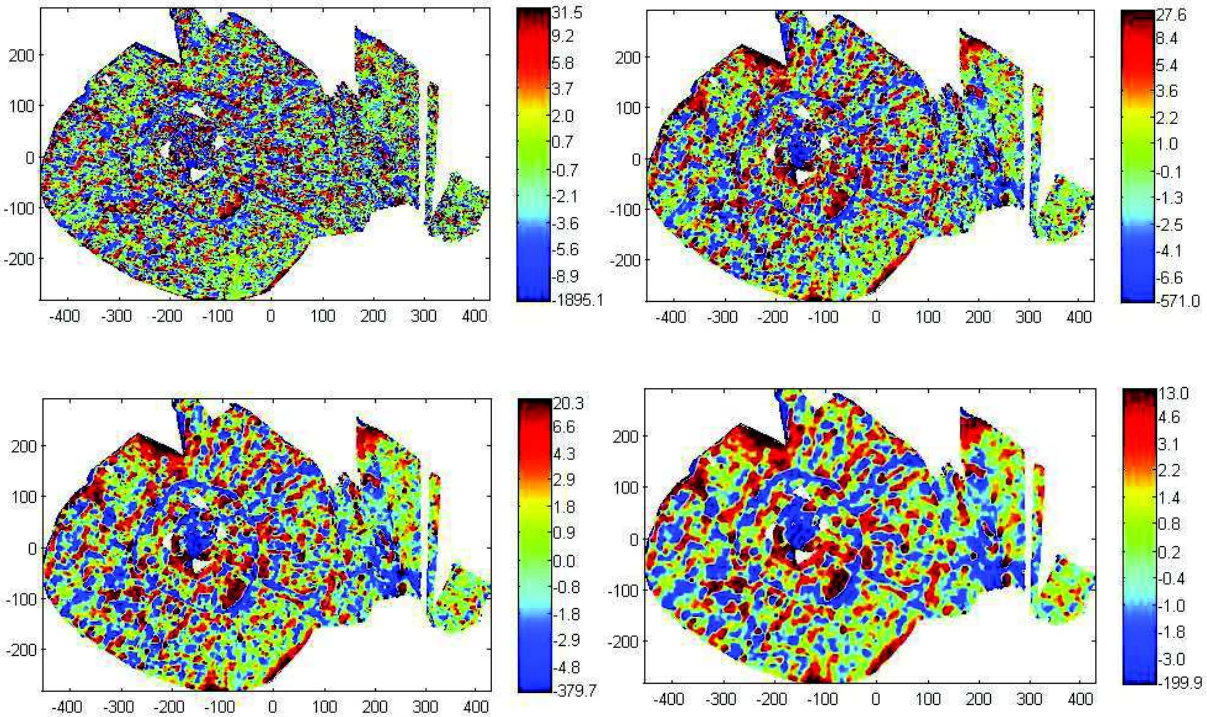


Figure 5.10 ***carte d'anomalie magnétique Sh'airat à gauche en haut et prolongements vers le haut à 1, 2 et 3 m, apparition de structures à grande longueur d'onde avec l'augmentation du prolongement vers le haut.***

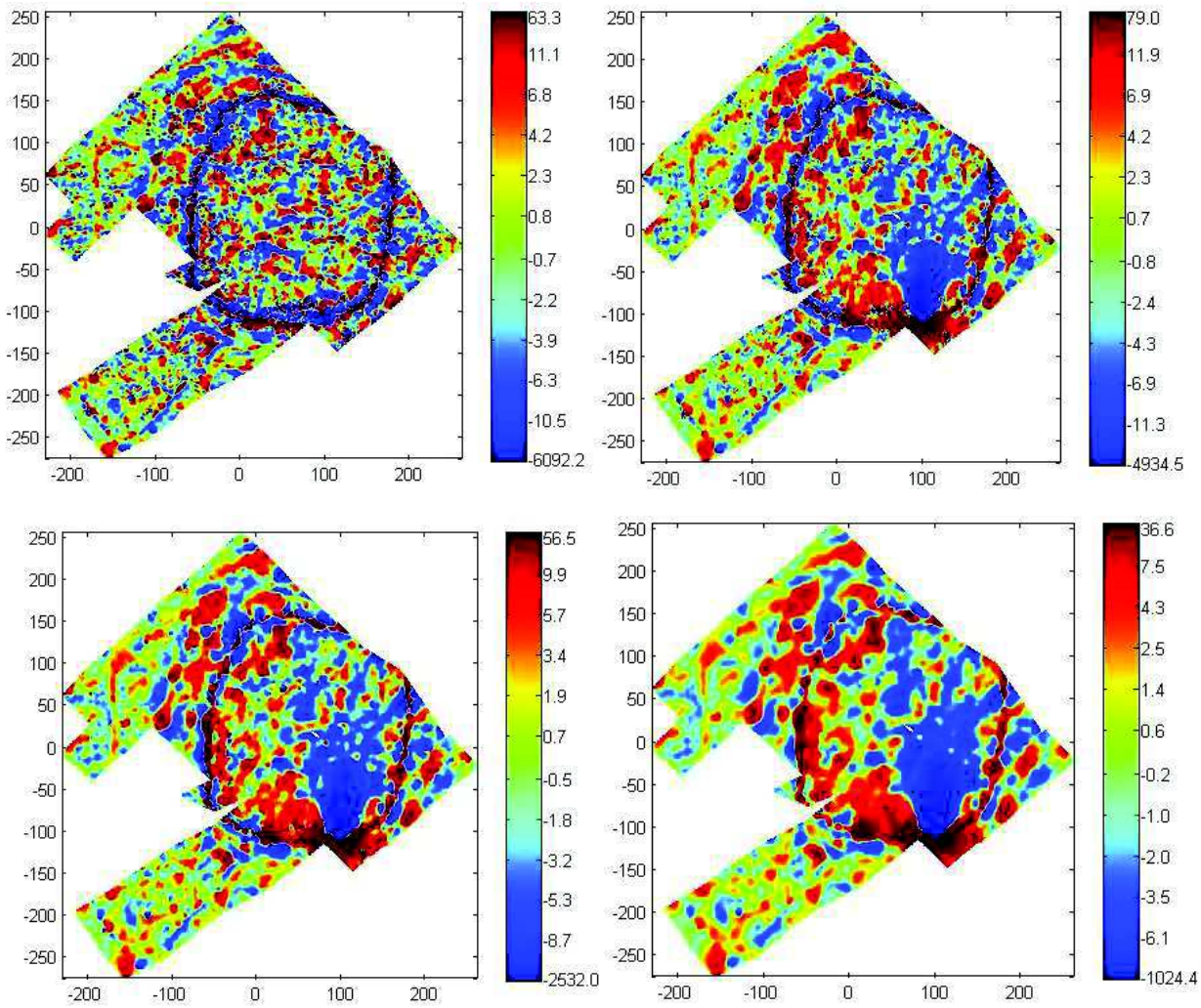


Figure 5.11 ***carte d'anomalie magnétique de Malhat Ed-Deru à gauche en haut et prolongement vers le haut à 1, 2 et 3 m, apparition de structures à grande longueur d'onde avec l'augmentation du prolongement vers le haut.***

16.3.2. Prolongement vers le bas

L'opérateur de prolongement vers le bas est l'opérateur inverse de l'opérateur de prolongement vers le haut. On l'utilise pour renforcer les anomalies de courte longueur d'onde. On a appliqué cet opérateur sur les cartes d'anomalie des trois sites et on a prolongé l'anomalie magnétique à 25 cm, puis 50 cm (Figure 5.12, 5.13, 5.14). Au-delà les données deviennent inexploitables car trop bruitées. Comme indiqué dans le chapitre 3, il peut s'agir d'un problème d'instabilité numérique, le pas de la grille étant de 25 cm, un prolongement à deux pas vers le bas donne une dynamique de l'opérateur de 1 à $5{,}2.10^7$. On observe quand même que les résultats sont acceptables à certains endroits pour Al-Rawda et que pour les deux autres sites le prolongement à 50 cm ne montre que du bruit en raison de la présence d'anomalies magnétiques de forte amplitude. Comparé à la dérivation verticale, le prolongement vers le bas n'apporte rien.

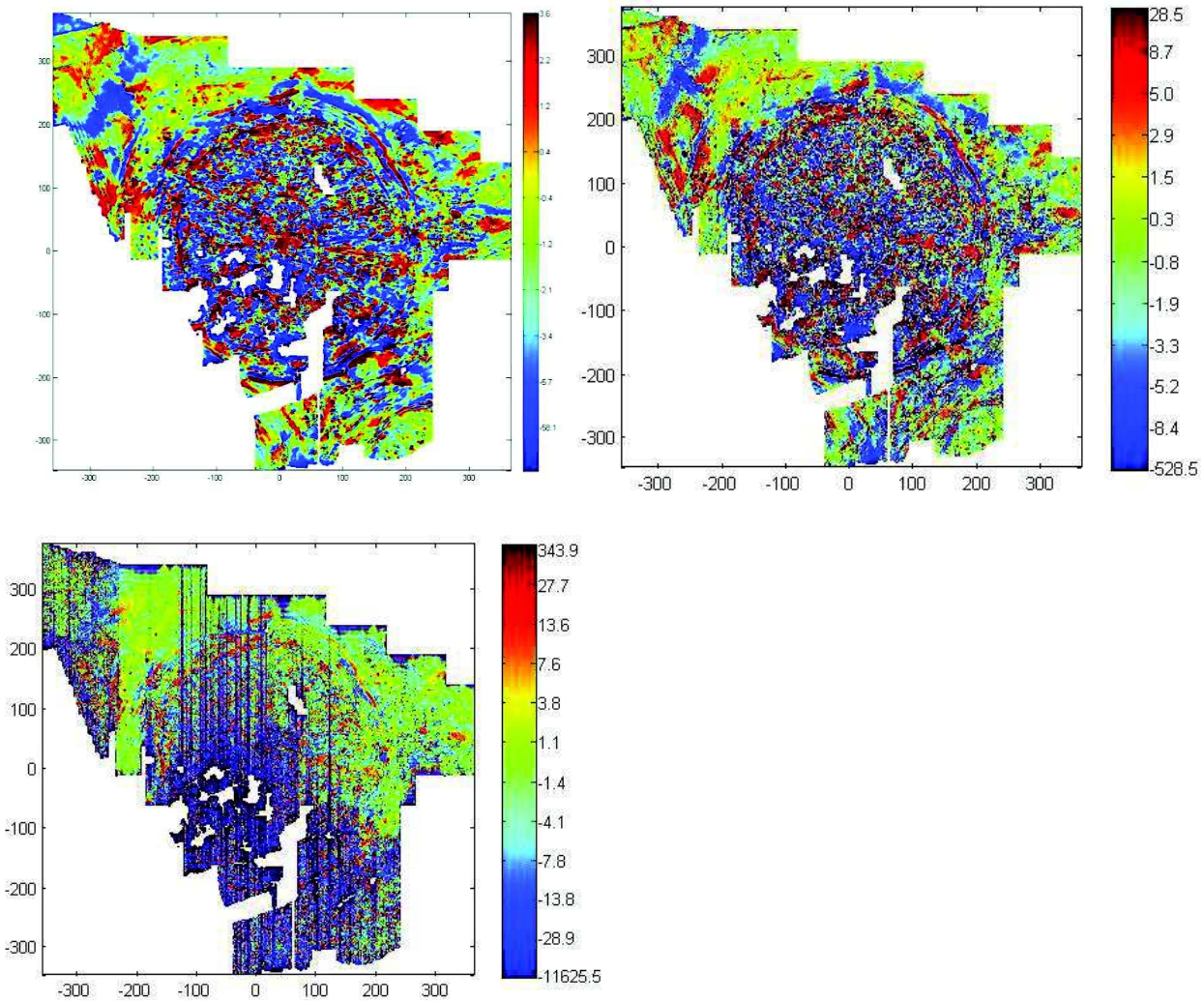


Figure 5.12 ***carte d'anomalie magnétique d'Al-Rawda et prolongement vers le bas à 25 cm et 50 cm.***

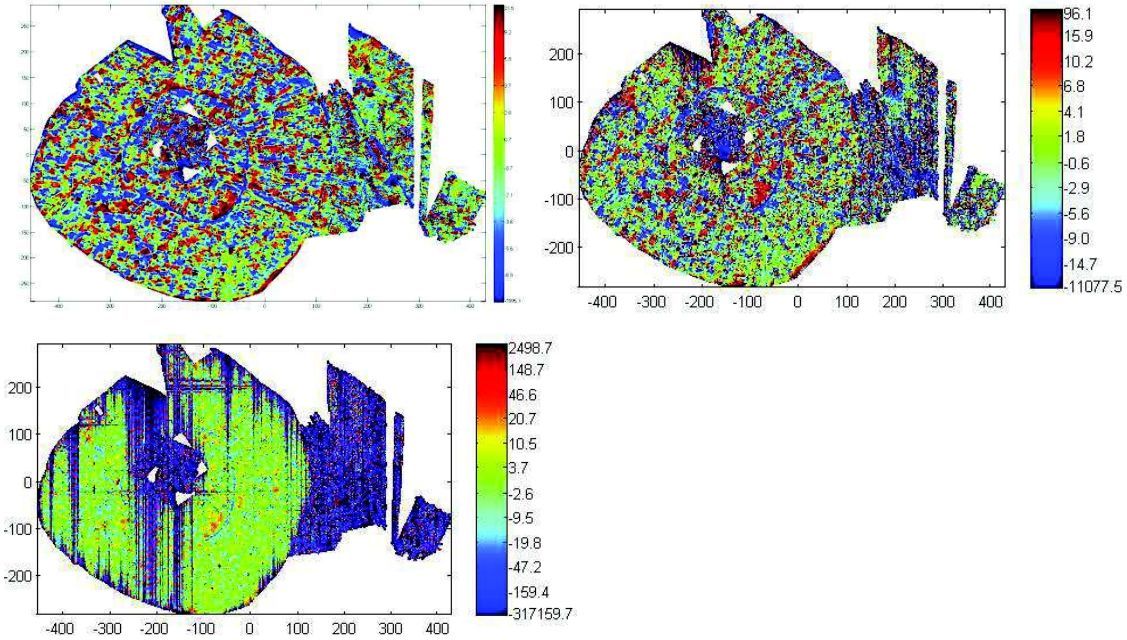


Figure 5.13 ***carte d'anomalie magnétique de Tell Sh'airat et prolongement vers le bas à 25 cm et 50 cm.***

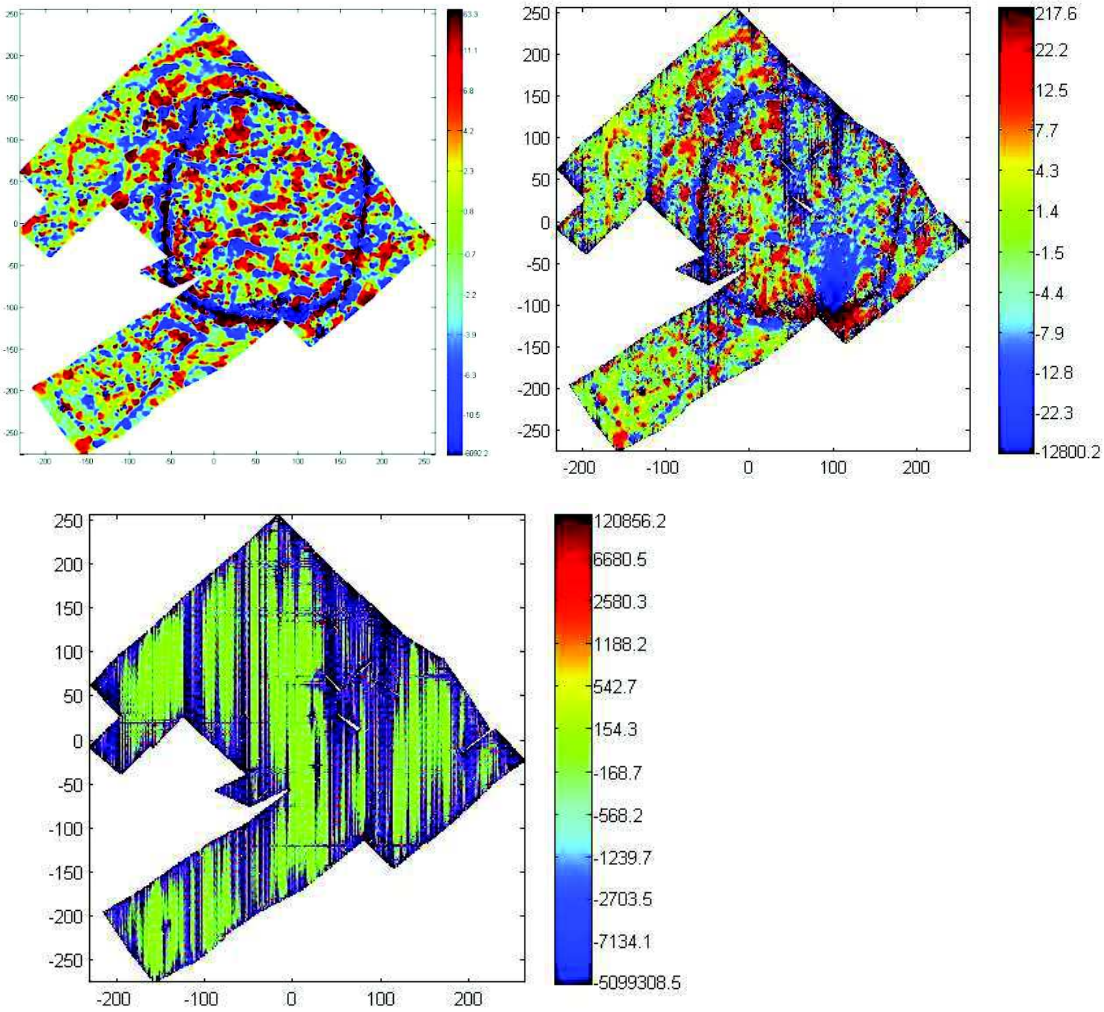


Figure 5.14 ***carte d'anomalie magnétique de Malhat Ed-Deru et prolongement vers le bas à 25 cm et 50 cm.***

16.4. Le signal analytique

On a appliqué l'opérateur de signal analytique d'ordre 1 sur les trois cartes des sites (Figure 5.15, 5.16 et 5.17). Sur les trois cartes on constate que les structures apparaissent plus finement que dans la carte d'anomalie magnétique.

Sur la carte du signal analytique de tell Al-Rawda on voit mieux la rue circulaire la plus centrale et le temple au nord-ouest du tell est mieux marqué. Sur la carte de Sh'airat, la ligne entourant la zone centrale apparait mieux et les rues radiales aussi semblent plus claires. Pour Malhat Ed-Deru le rempart intérieur est bien mieux marqué et plus fin. Les rues radiales apparaissent mieux que sur la carte d'anomalie.

Généralement, en termes d'interprétation, et par rapport aux cartes de dérivée verticale on se rend compte que le signal analytique n'apporte pas grand-chose.

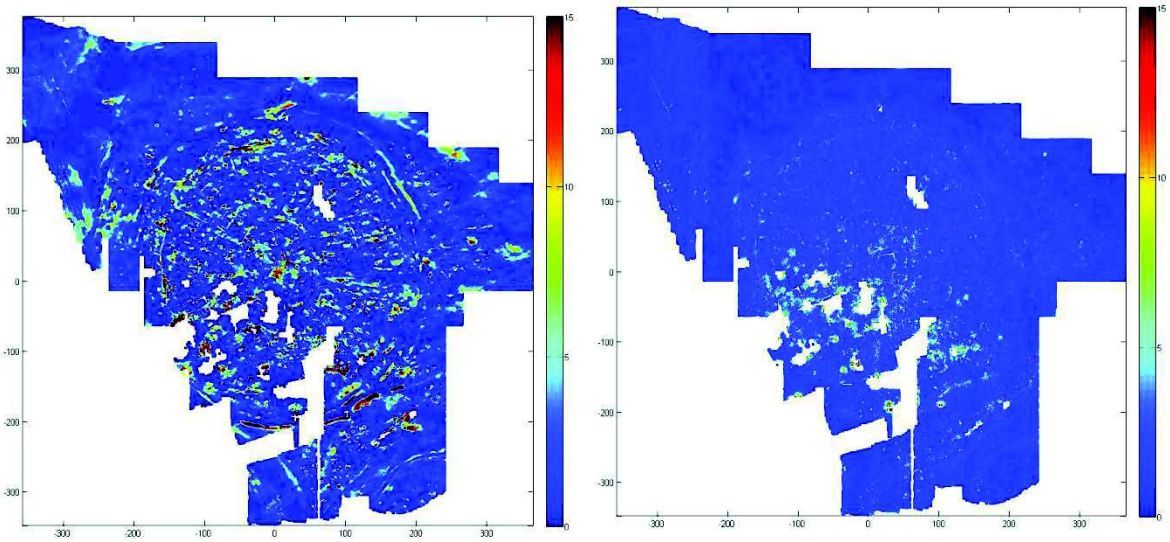


Figure 5.15 *carte d'anomalie magnétique de Tell Al-Rawda à gauche et carte du signal analytique d'ordre 1 à droite*

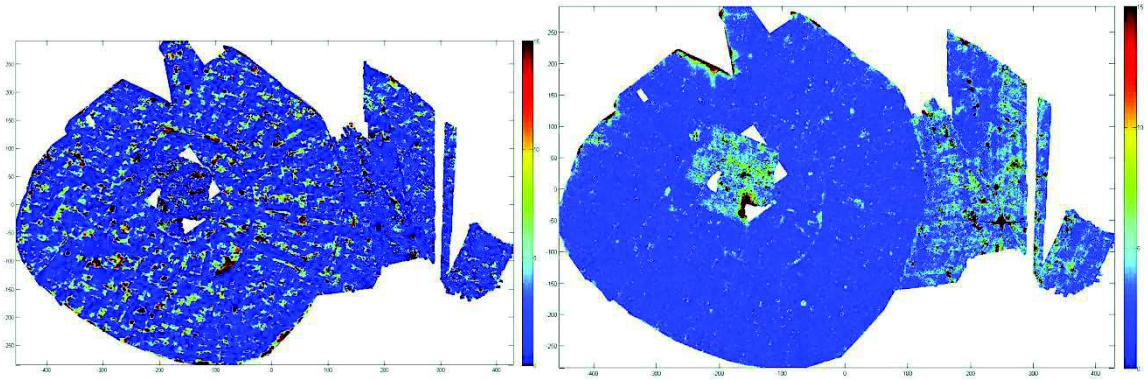


Figure 5.16 *carte d'anomalie magnétique de Tell Sh'airat à gauche et carte du signal nalytique d'ordre 1 à droite*

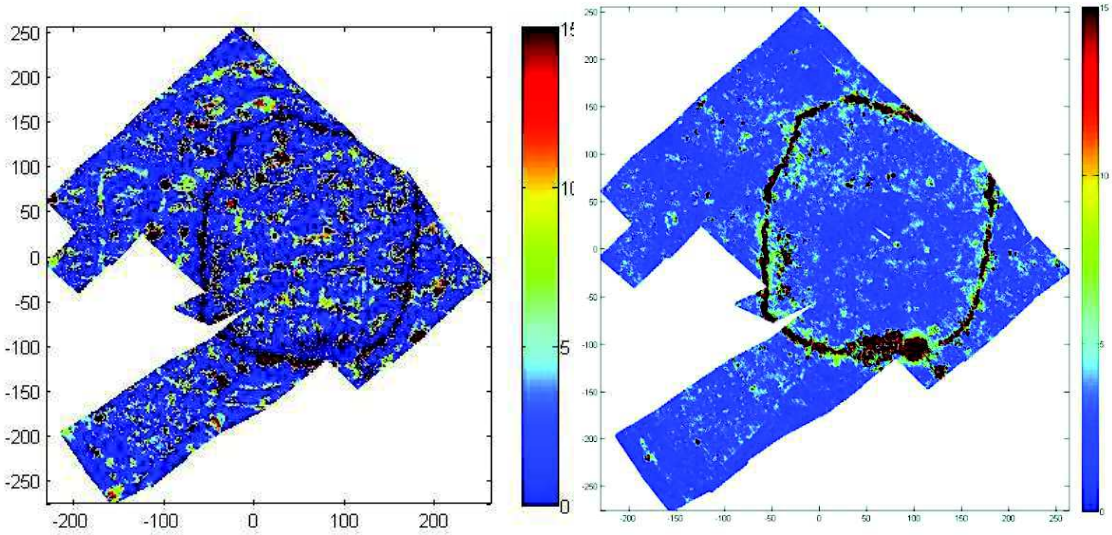


Figure 5.17 *carte d'anomalie magnétique de Malhat Ed-Deru à gauche et carte du signal analytique d'ordre 1 à droite*

On a comparé la carte du signal analytique et la carte de dérivée verticale de la zone centrale du site Al-Rawda et on a obtenu les résultats suivant (Figure 5.18) :

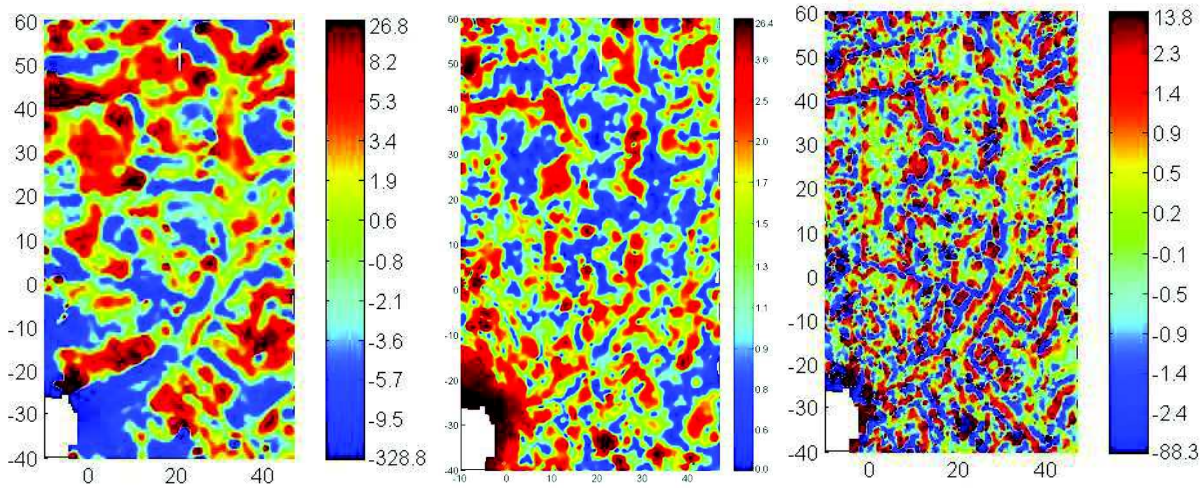


Figure 5.18 ***Carte d'anomalie magnétique brute de la zone centrale à gauche, carte du signal analytique au milieu et carte de dérivée verticale d'ordre 2 à droite.***

On observe que la carte de la dérivation verticale est plus précise que la carte du signal analytique. Par exemple on n'observe pas la rue circulaire C1 sur la carte du signal analytique alors qu'elle apparait bien sur la carte de dérivation verticale. Les rues radiales au sud-est de la carte qui sont bien marquées sur la carte de dérivation verticale n'apparaissent pas sur la carte de signal analytique. On constate donc que la carte de signal analytique n'apporte pas grand-chose en terme d'interprétation de la carte par rapport à la carte de dérivation verticale.

Dans le chapitre précédent, on a vu qu'on peut utiliser le signal analytique pour définir la largeur de rue qui sont plus larges que 3 m et à 1 m de profondeur. À partir de cela on peut utiliser le signal analytique sur certaines zones plus réduites et essayer de voir si on observe la largeur de la rue circulaire dans la zone centrale (Figure 5.19).

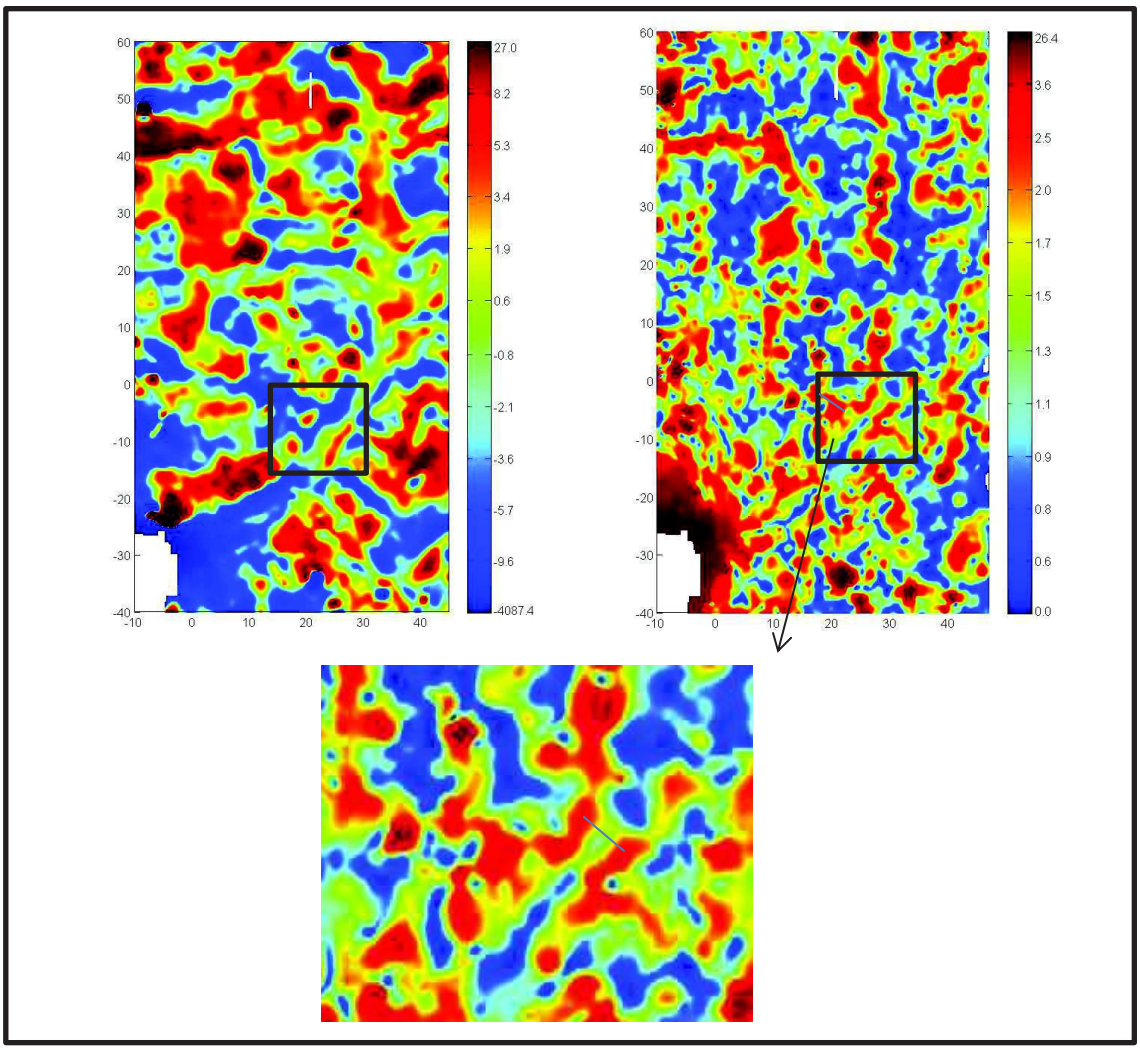


Figure 5.19 ***carte d'anomalie magnétique de la zone centrale de Tell Al-Rawda à gauche et signal analytique d'ordre 1 à droite. Zoom sur le signal analytique en bas***

D'après la carte du signal analytique, la largeur de la rue circulaire est de 5 m. On peut aussi appliquer cet opérateur pour définir la largeur de la structure qui apparait dans la zone sud de tell Al-Rawda (Figure 5.20) et on obtient une largeur de 5 m environ.

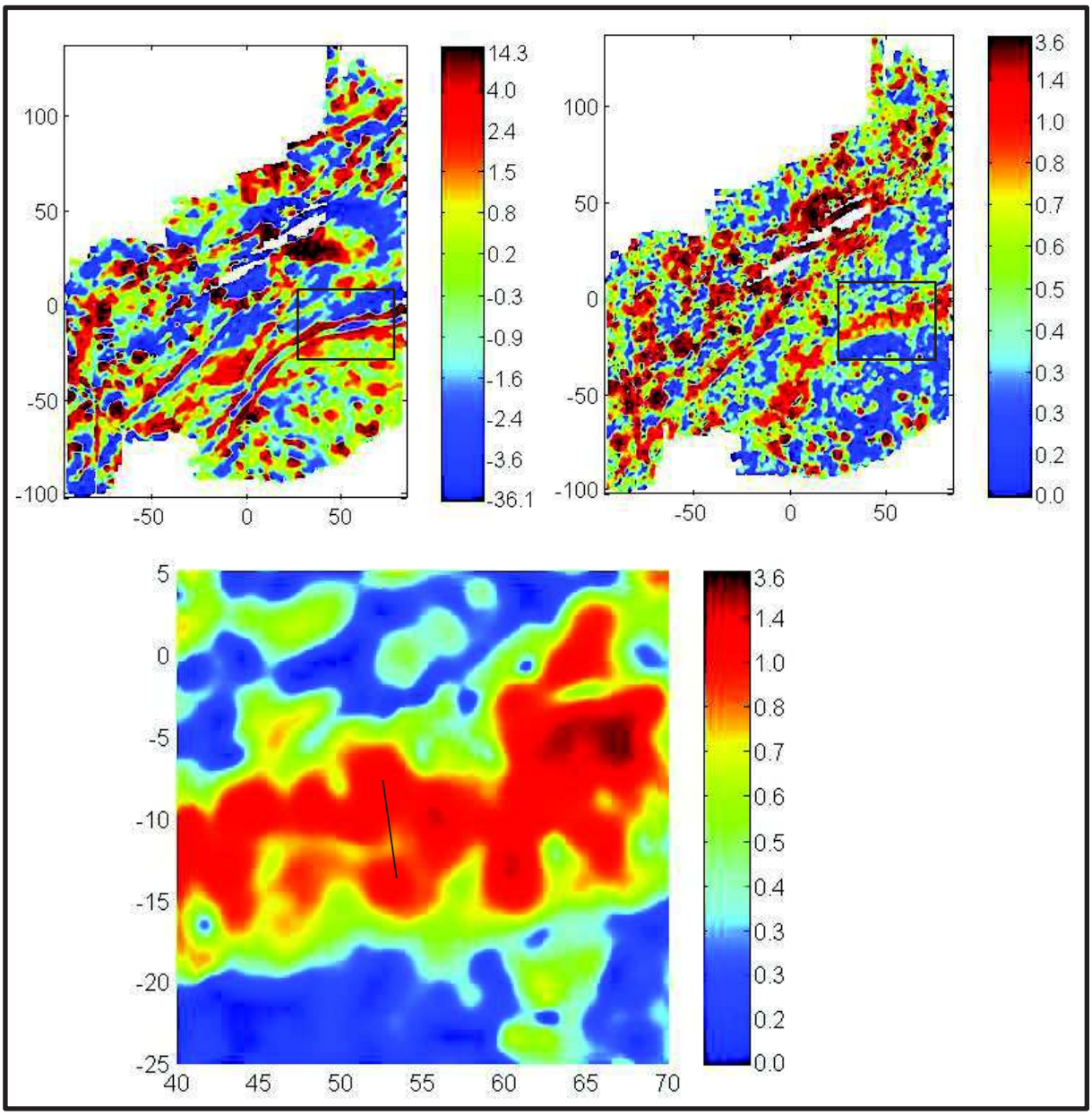
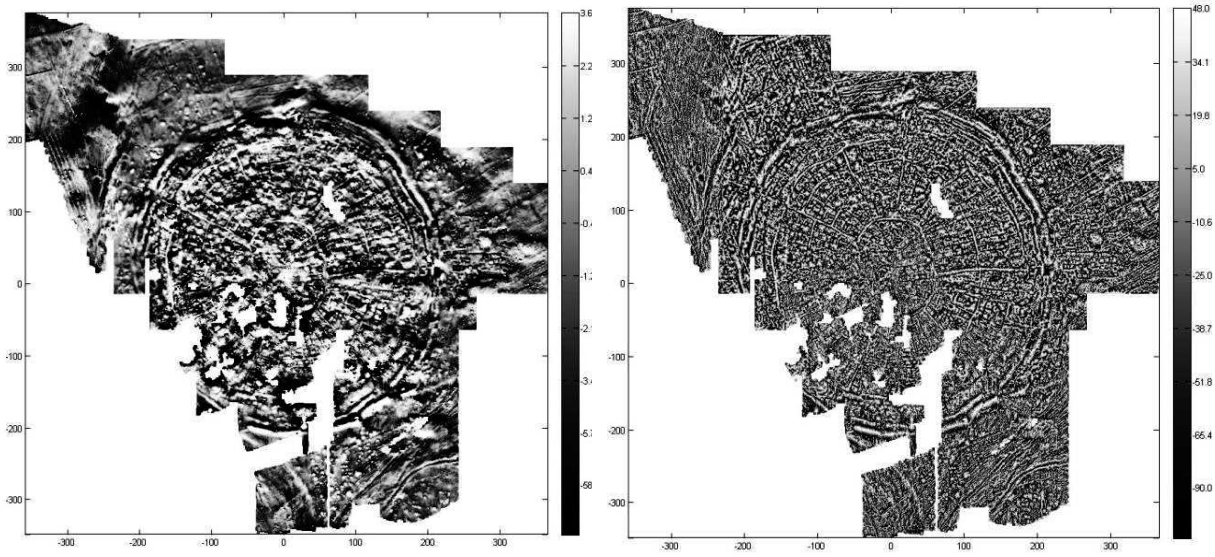
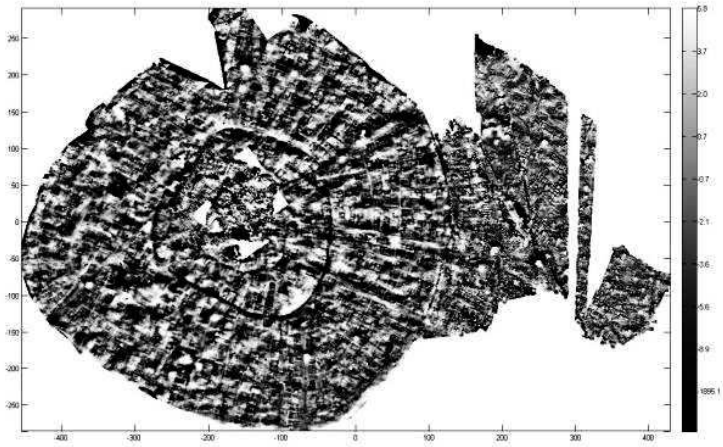


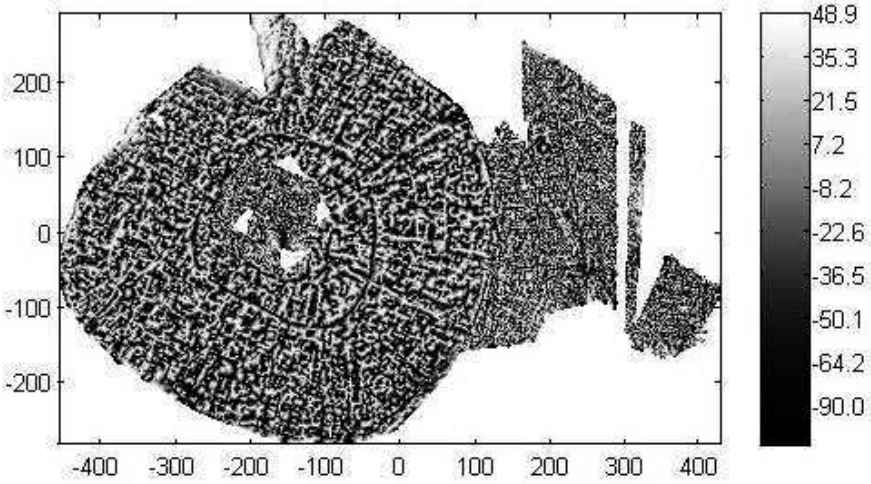
Figure 5.20 ***carte d'anomalie magnétique de la zone sud de Tell Al-Rawda à gauche et carte du signal analytique d'ordre 1 à droite. Zoom sur le signal analytique en bas.***

16.5. Le tilt angle

Avec l'opérateur de tilt angle, on calcule un angle qui conduit à représenter toutes les anomalies de faible ou forte amplitude à peu près de la même manière et on a vu que cet opérateur fourni des informations directes sur la profondeur. La figure 5.21 montre les cartes des trois sites après l'application de l'opérateur de tilt angle.







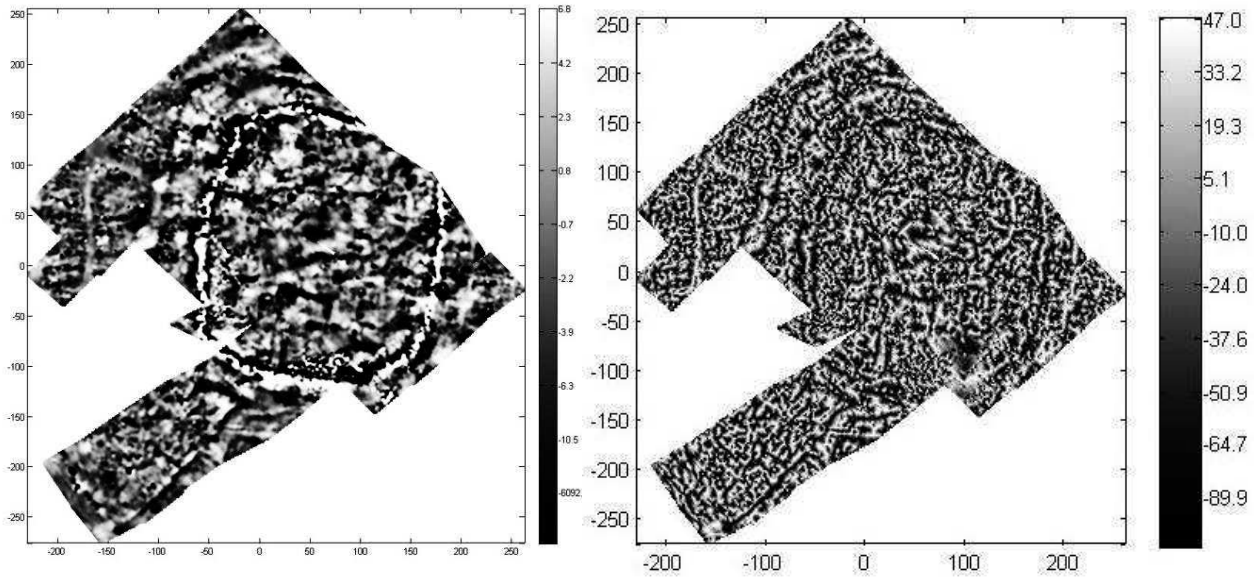


Figure 5.21 ***cartes d'anomalie magnétique à gauche et carte de tilt angle à droite pour les trois sites (Al-Rawda, Sh'airat, Malhat Ed-Deru).***

Sur les cartes de tilt angle, il est nettement plus facile de tracer les limites des structures et les rues et les remparts se dessinent bien. Dans la carte de tilt angle d'Al-Rawda on remarque bien la rue radiale qui sort du centre de la ville en direction de l'est. Les rues plus étroites apparaissent bien aussi sur la carte. Dans la zone centrale on peut bien voir les rues radiales étroites qui n'apparaissent pas dans la carte de l'anomalie magnétique. C'est le même cas pour la carte de Sh'airat. Par exemple, la carte de tilt angle montre mieux les rues radiales à l'est de la ville haute. Enfin, l'opérateur fait apparaitre une voie ovale dans la ville haute de la carte de Malhat Ed-Deru qui n'était pas bien observée sur la carte d'anomalie magnétique. Pour voir quelle est la carte la plus précise sur laquelle on peut baser pour l'interprétation, on a comparé la carte de tilt angle avec la carte de dérivation verticale (Figure5. 22).

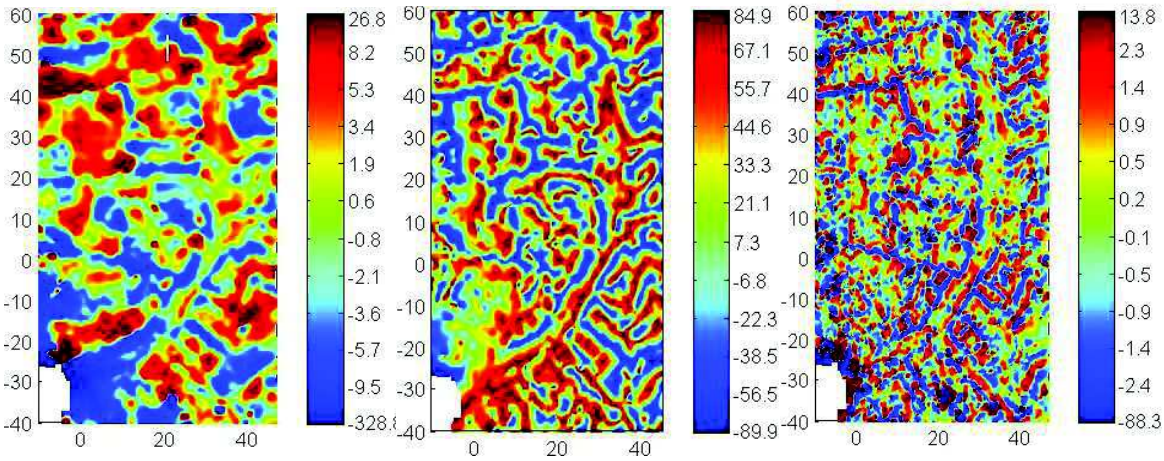


Figure 5.22 ***Carte d'anomalie magnétique brute de la zone centrale à gauche, carte de tilt angle au milieu et carte de dérivée verticale d'ordre 2 à droite.***

De cette comparaison on trouve que la carte de dérivation verticale est plus fine et on voit mieux les rues radiales et circulaires.

17. Interprétations à partir de la carte de dérivée d'ordre 1.5

Après avoir testé tous les opérateurs de transformation de carte on a trouvé que le meilleur opérateur est la dérivation verticale après l'application de l'opérateur de double réduction au pôle. Pour cette raison on se base sur la carte dérivation verticale de la double réduite au pôle pour interpréter les cartes de trois sites.

Les interprétations consistent à identifier des lignes sur les cartes de dérivée verticale d'ordre 1,5. Leur signification a fait l'objet de discussions avec Corinne Castel, Philippe Quenet et Georges Mouamar

17.1. Al-Rawda

À partir de la carte de la dérivée verticale d'ordre 1,5 (Figure 5.23) on dessine le plan de la ville en traçant les rues radiales et circulaires (Figure 5.24 et 5.25). Toutes les rues, larges ou étroites ont pu être tracées.

On voit dans la Figure 5.26a que la largeur de la rue radiale R3 augmente vers le nord-ouest. On peut définir la largeur de la rue au croisement avec la rue circulaire à 3 m et à 3,5 m au nord-ouest, la largeur de la rue R3 est de 3.6 m au carrefour avec C2 (d'après la fouille la rue C2 a une largeur de 3m). La largeur de la rue R2 (Figure 5.26b) est de 4 m et la largeur de la rue R1 est de 5 m (Figure 5.26c).

Les rues circulaires sont bien marquées aussi sur la carte et on peut définir la largeur des rues circulaires principales. Au nord, la largeur de la rue C1 est de 3,5m (Figure 5. 26d). Cette rue a une forme ovale et entoure la zone centrale. La largeur de la rue C2 à l'est est de 4 m (Figue 5.26f). Enfin la largeur de la rue C3 au nord-est est de 3,7 m (Figure 5.26e).

D'après ces mesures, on voit que les rues soit radiales ou circulaires ont des largeurs différentes qui varient entre 3 m et 5 m. On ne trouve pas de logique de cette variation de largeur des rues principales pour le site Al-Rawda

Figure 5.23 ***carte de dérivée verticale d'ordre 1,5 du site Al-Rawda sur fond d'image Google Earth (ensemble des données Eost et des données du laboratoire de Lyon).***

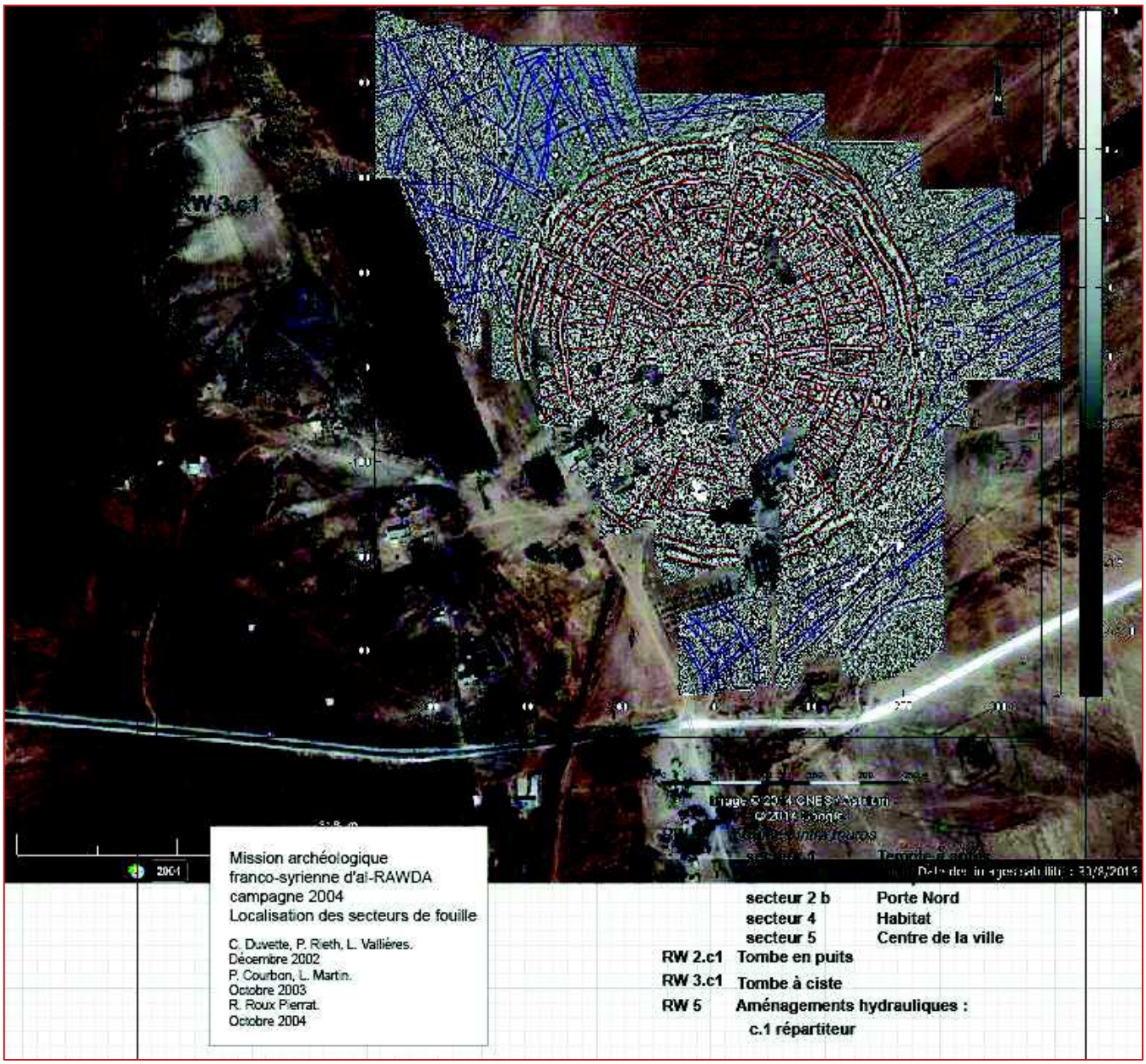


Figure 5.24 ***carte de dérivée verticale d'ordre 1,5 de la ville Al-Rawda sur fond d'image Google Earth et identification des principales linéations (lignes rouges à l'intérieur de la ville, lignes bleues à l'extérieur de la ville).***

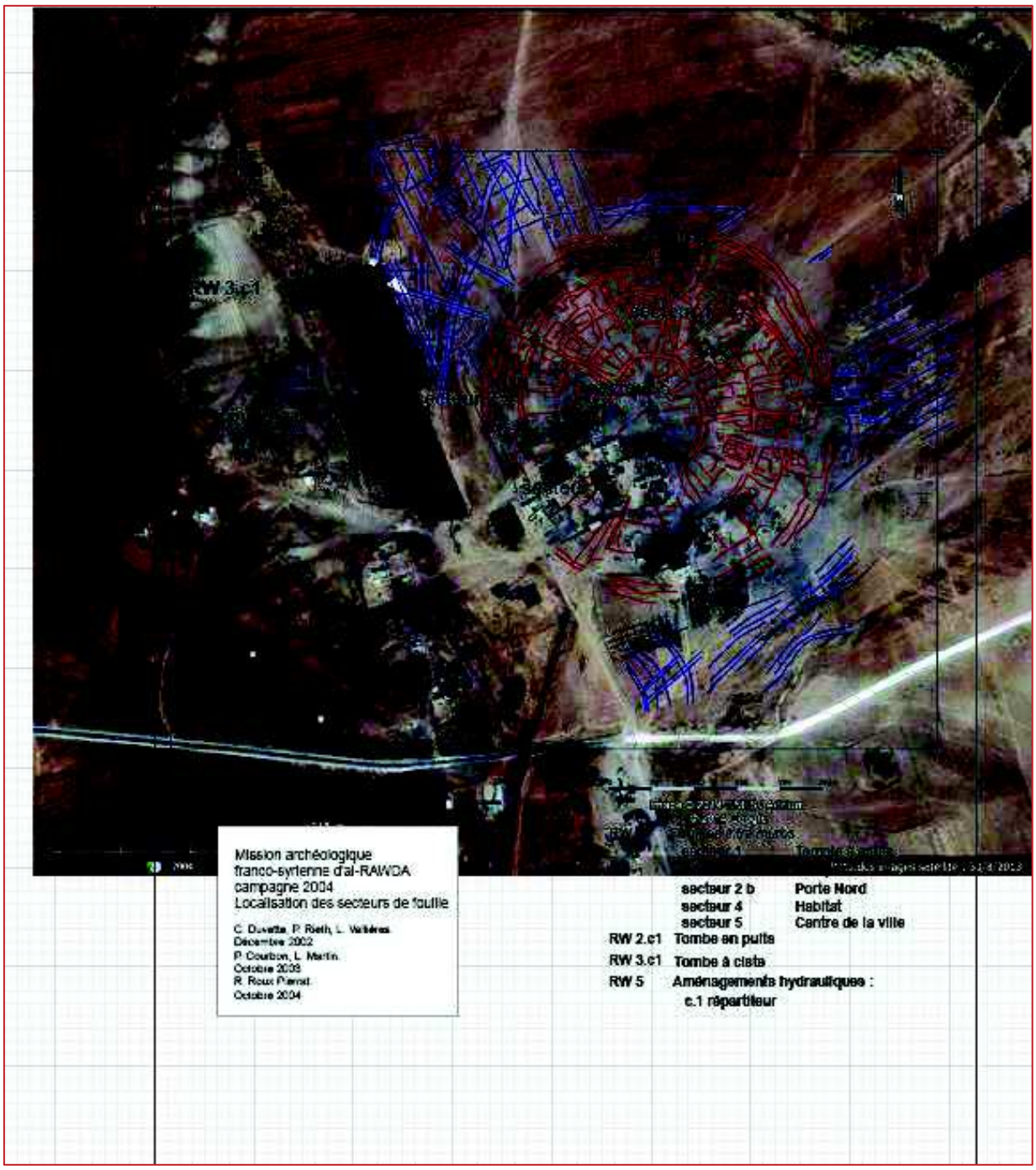


Figure 5.25 ***carte d'identification des linéations magnétiques de la ville Al-Rawda sur fond d'image Google Earth (lignes rouges à l'intérieur de la ville, lignes bleues à l'extérieur de la ville).***

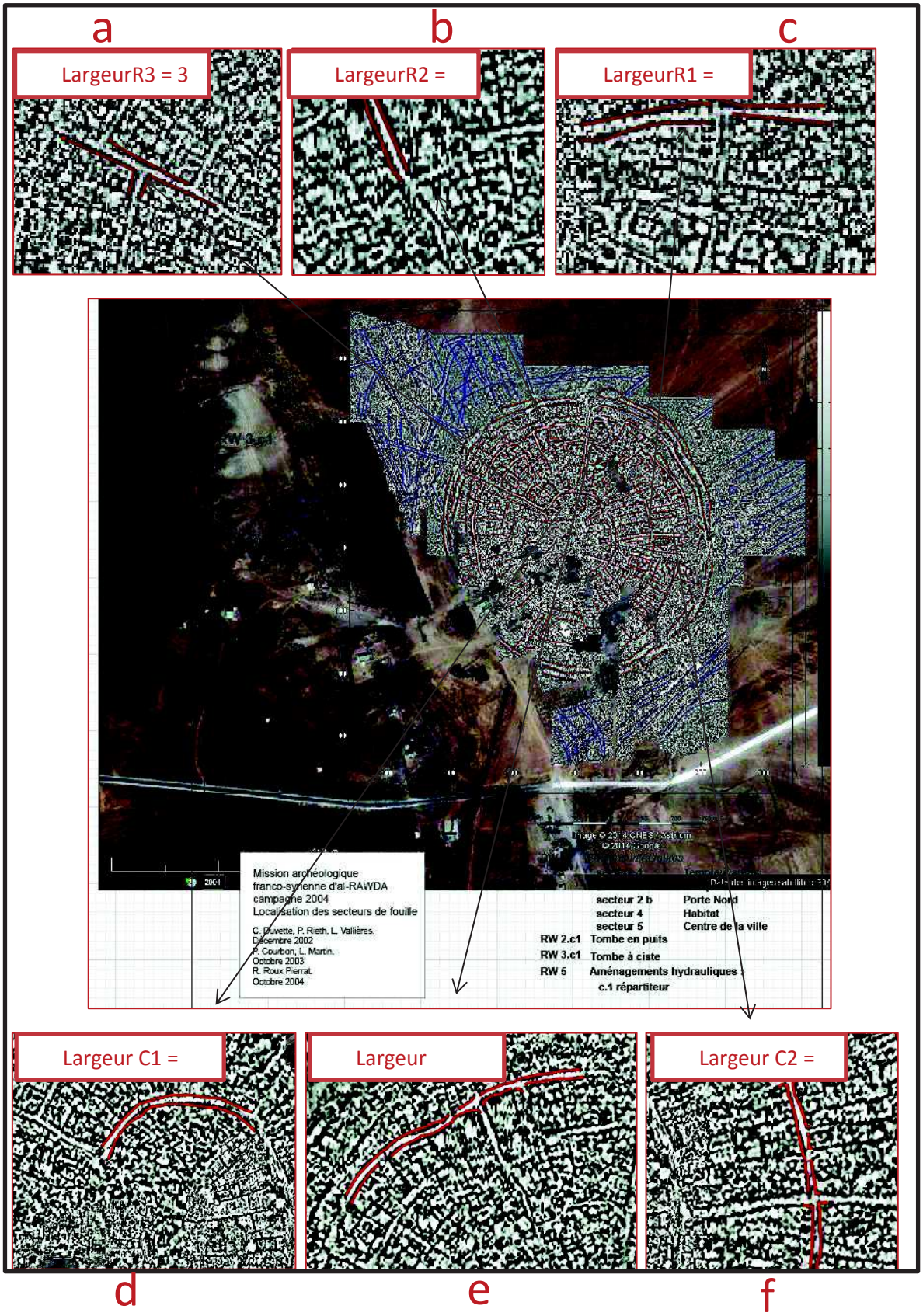


Figure 5.26 *carte de dérivée verticale d'ordre 1,5 de la ville Al-Rawda montrant les rues radiales et circulaires principales et leur identification et largeurs.*

La géométrie des bâtiments apparait précisément dans la carte de dérivée verticale d'ordre 1,5. En particulier, un bâtiment apparait clairement à la limite nord-ouest de la zone centrale : sa longueur est de 40 m environ ; sa largeur du côté sud-est est de 15 m et du côté nord-ouest de 20 m (Figure 5.27a).

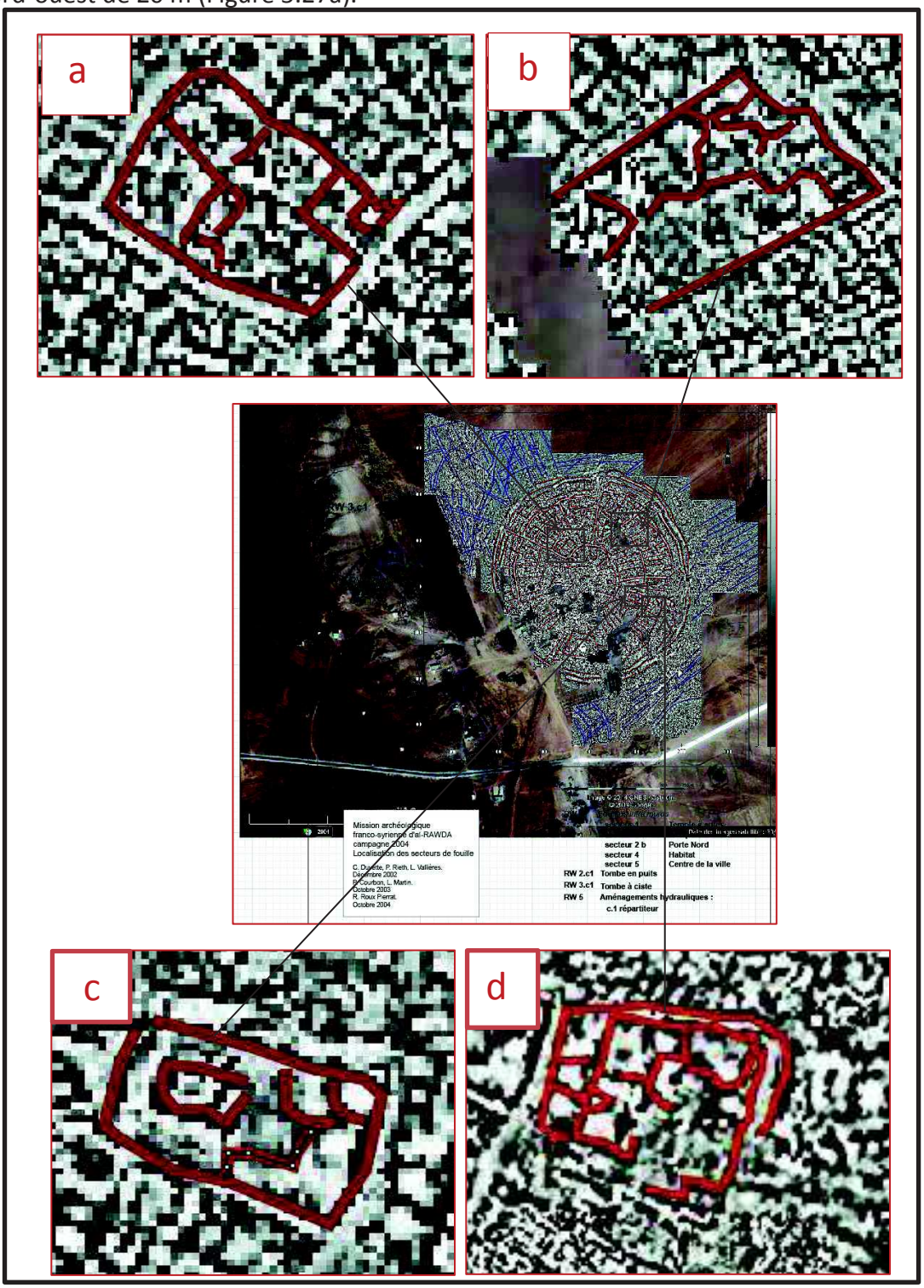


Figure 5.27 *carte de dérivée verticale d'ordre 1,5 de la ville Al-Rawda montre la géométrie des structures*

Un autre bâtiment qui est probablement un temple, apparait bien au sud-est de la ville (Figure 5.27c). Sa largeur est de 30 m et sa longueur est de 40 m. Une structure est observée au sud-ouest ; sa largeur est de 30 m et sa longueur est de 40 m du côté ouest et de 45 m du côté est (Figure5.27d).

Dans le secteur un au nord-est de la ville un temple a été complétement fouillé, On peut bien distinguer l'architecture de ce temple sur la carte de dérivation verticale (Figure 5.27b).

Si on compare le plan de fouille avec la carte de dérivation verticale on voit qu'il y a une bonne correspondance entre les deux cartes, par exemple la structure ronde au nord-est de la fouille apparaît bien sur la carte de la dérivation verticale. On voit aussi toutes les structures qui apparaissent au sud-est du plan de fouille. Par contre la ligne au milieu du temple sur la carte de dérivation verticale n'est pas identifiée dans les fouilles (Figure5. 28).

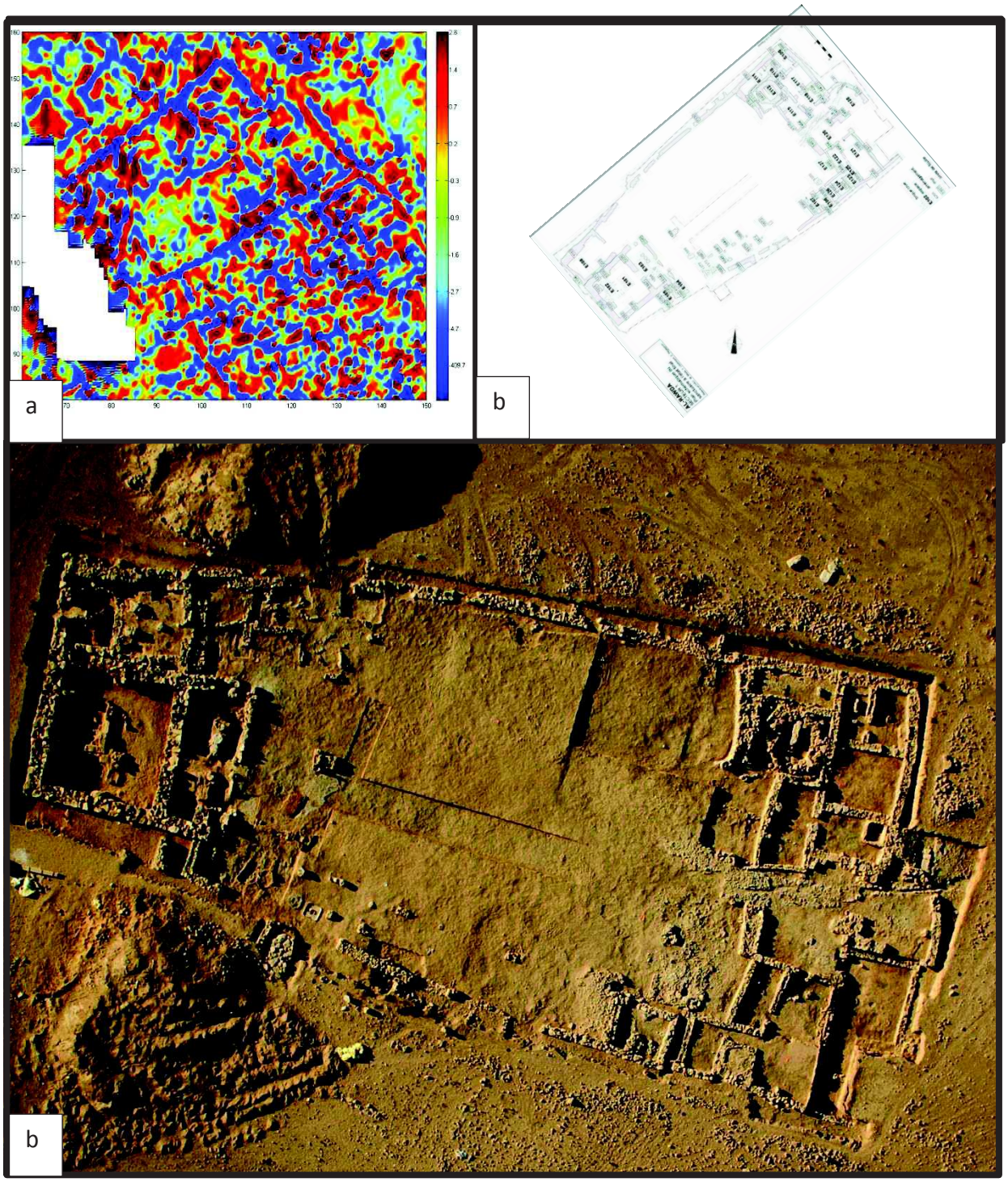


Figure 5.28 ***A : carte de dérivée verticale 1.2 (carrés 6-8-31-32) à gauche. b : plan de fouille de l'état final du secteur 1 (site Al-Rawda). c : photographie aérienne du complexe religieux du secteur 1 prise au cerf-volant au terme de la campagne2006. © Mission archéologique d'Al-Rawda; Cliché O. Barge.***

Ona superposé le plan de fouille sur la carte de dérivation vertiacle et on trouve une bonne superposition avec les murs en bonne correspondence (Figure 5.29).

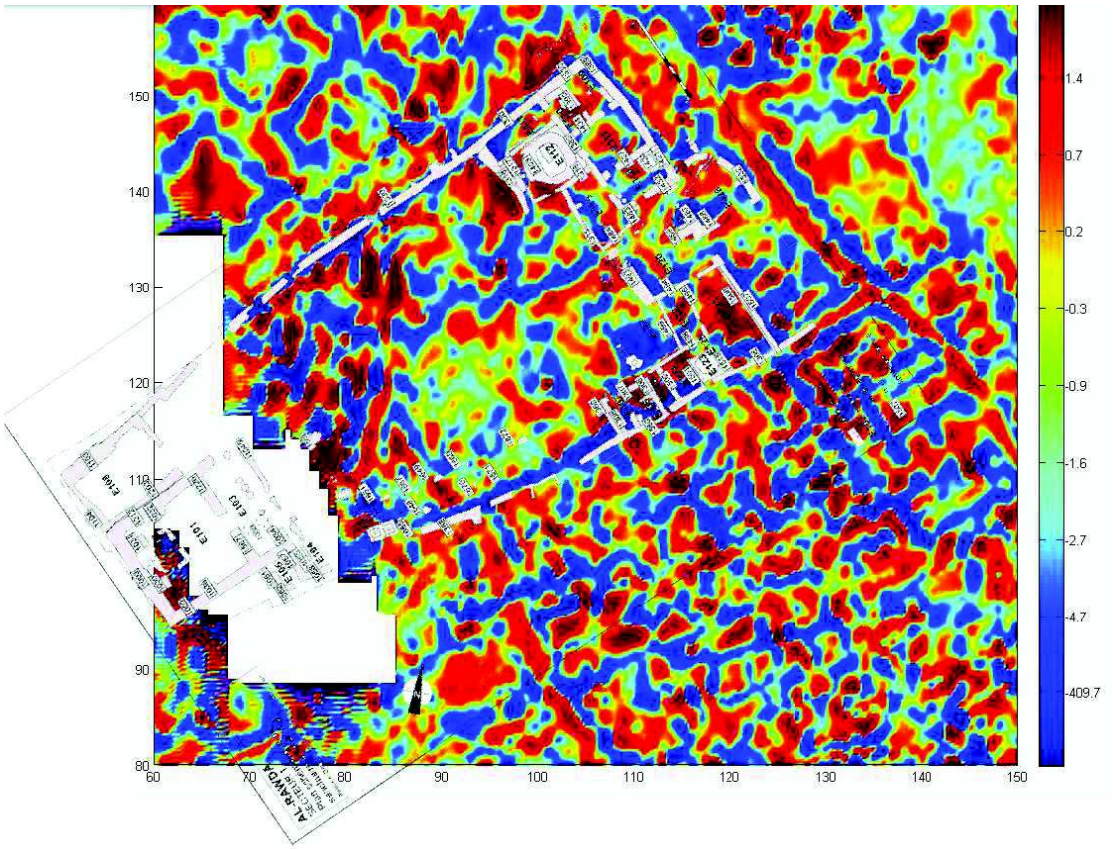


Figure 5.29 ***Superposition du plan de fouille de secteur 1 dans la ville Al-Rawda sur la carte de dérivée verticale d'ordre 1.2.***

À l'extérieur de la ville à côté de la porte Est (Figure 5.30a), on remarque qu'il y a des structures de forme carrée. Le style de construction n'est pas le même que celui des bâtiments à l'intérieur de ville. Ces constructions ont été étudiées par les archéologues qui ont trouvé qu'elles sont beaucoup plus récentes que le bronze ancien, et pourraient remonter à l'époque roman- byzantine (Castel et al., 2014). Les lignes de direction nord-est sud-ouest sont des murs construits récemment pour limiter des champs agricoles.

Du côté ouest de la ville (Figure 5.30b), on remarque des rues radiales partant du centre de la ville en direction du nord-ouest et continuant à l'extérieur du rempart. Les lignes parallèles qui ont une direction nord-ouest sud-est à la limite ouest de la carte sont des alignements d'anomalies liés à la culture récente des oliviers. Pour les autres lignes on n'a généralement pas d'explication à leur présence même si l'on propose un système de canaux d'irrigation (Castel et al., 2008).

Au nord du tell on remarque quelques structures carrées dont la forme ressemble à celles déjà observées à l'est du tell (lignes bleues sur la Figure 5.30c) qui pourraient dater aussi de l'époque roman-byzantine d'après leurs dimensions et leurs plans. À proximité de ces structures, les lignes de direction nord-ouest sud-est sont des murs anciens, mais plus récents que le bronze ancien (lignes rouges sur la Figure 5.30c). Les autres lignes de cette zone sont des murs récents délimitant les champs agricoles.

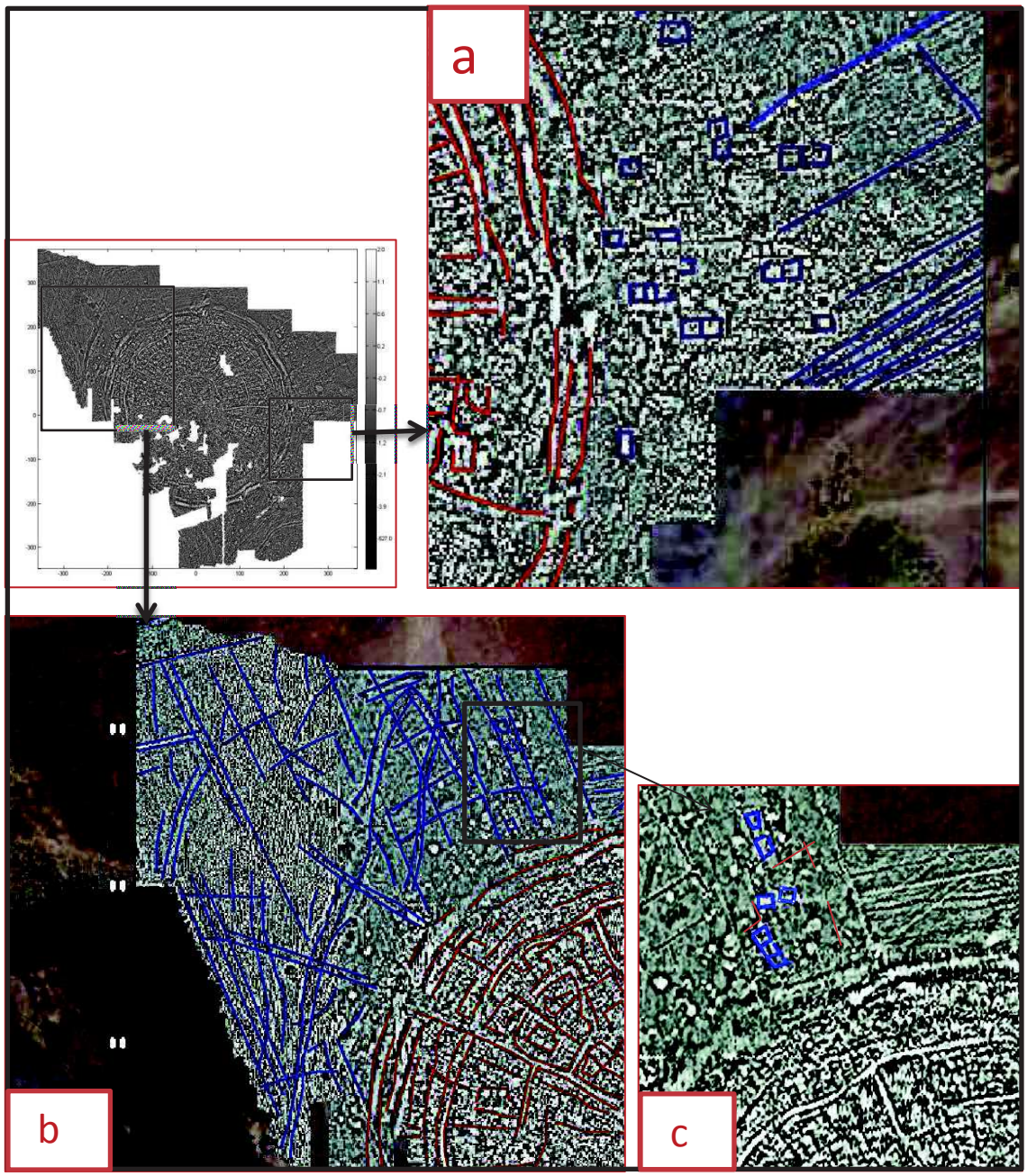


Figure 5.30 ***carte de dérivée verticale d'ordre 1,5 montrant les strectures carrées à l'extérieur du rempart du coté est (a) , les strectures carrées et les linéations du coté nord-ouest (b et c).***

Les deux lignes parallèles de la figure 5.31 qui ont une direction nord sud à l'ouest et s'incurvent vers l'est et correspondent probablement à un canal dont on pourrait délimiter ses bords

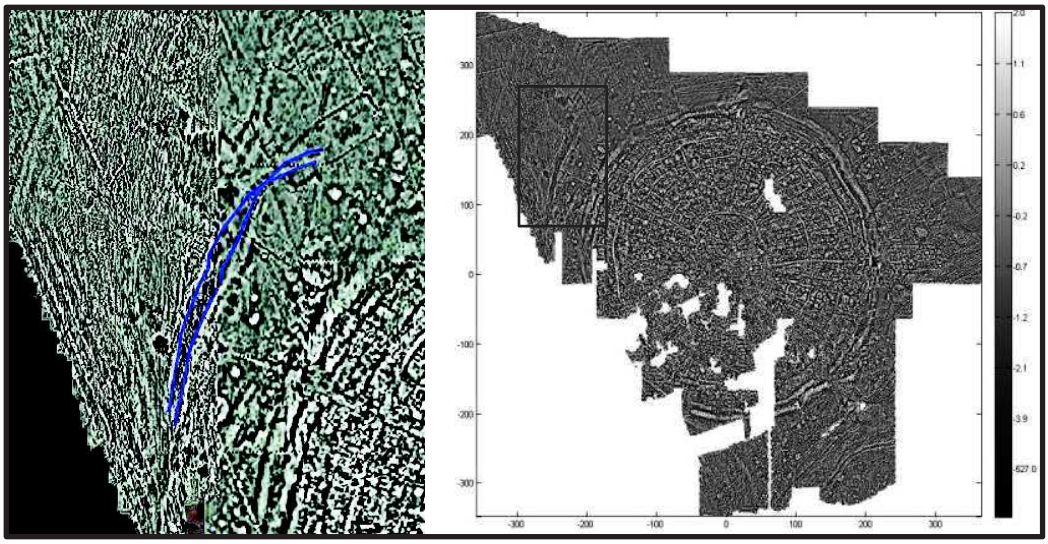


Figure 5.31 ***carte de dérivée verticale d'ordre 1,5 montrant au nord-ouest du tell, la possibilité de l'existence d'un canal.***

Au sud de la carte (Figure 5.32b) on remarque bien une structure qui vient du sud-ouest et continue vers l'est. Aucun signal en surface n'indique la présence de cette structure et nous proposons qu'il s'agisse d'un canal ancien lié au fonctionnement de la ville circulaire. On peut définir sa largeur à 5 m environ (Cette largeur avait déjà été établie avec la carte du signal analytique, figure 5.20).

Les lignes au nord de direction sud-ouest nord-est sont vraisemblablement liées à la sédimentation du wadi (Wadi Al-Amur). Il est possible que ces lignes se propagent jusqu'à l'est de la ville (Figure 5.32a). La ligne la plus au nord correspondrait à une digue.

Au sud de la carte (Figure5.32a) on remarque des lignes se croisant avec des directions nord-est sud-ouest et nord-ouest sud-est. Elles pourraient correspondre à des sédimentations correspondant à deux directions différentes liées à deux wadis.

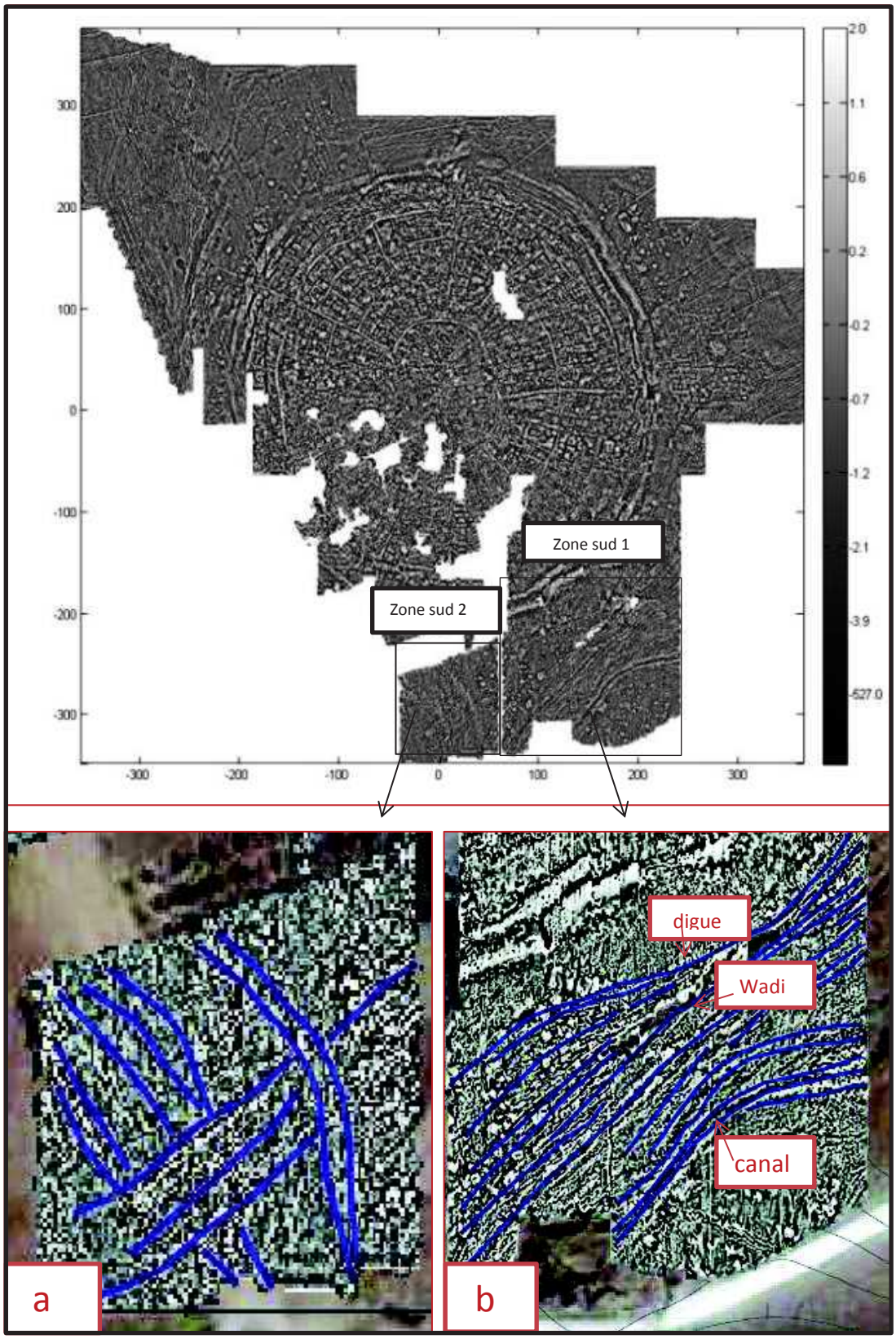


Figure 5.32 *carte de dérivée verticale d'ordre 1,5 au sud de la ville d'Al-Rawda, montrant une structure qui vient du sud-ouest et continue vers l'est.*

17.2. Sh'airat

La carte de dérivée verticale d'ordre 1,5 (Figure 5.33) nous fournit des informations suffisantes sur le plan de la ville et on peut en dessiner le plan complet. On remarque qu'il y a deux organisations dans la ville haute. À l'est, le plan est radioconcentrique avec des rues radiales et circulaires, par contre dans le sud on ne voit pas le même plan avec des rues plus à angle droit.

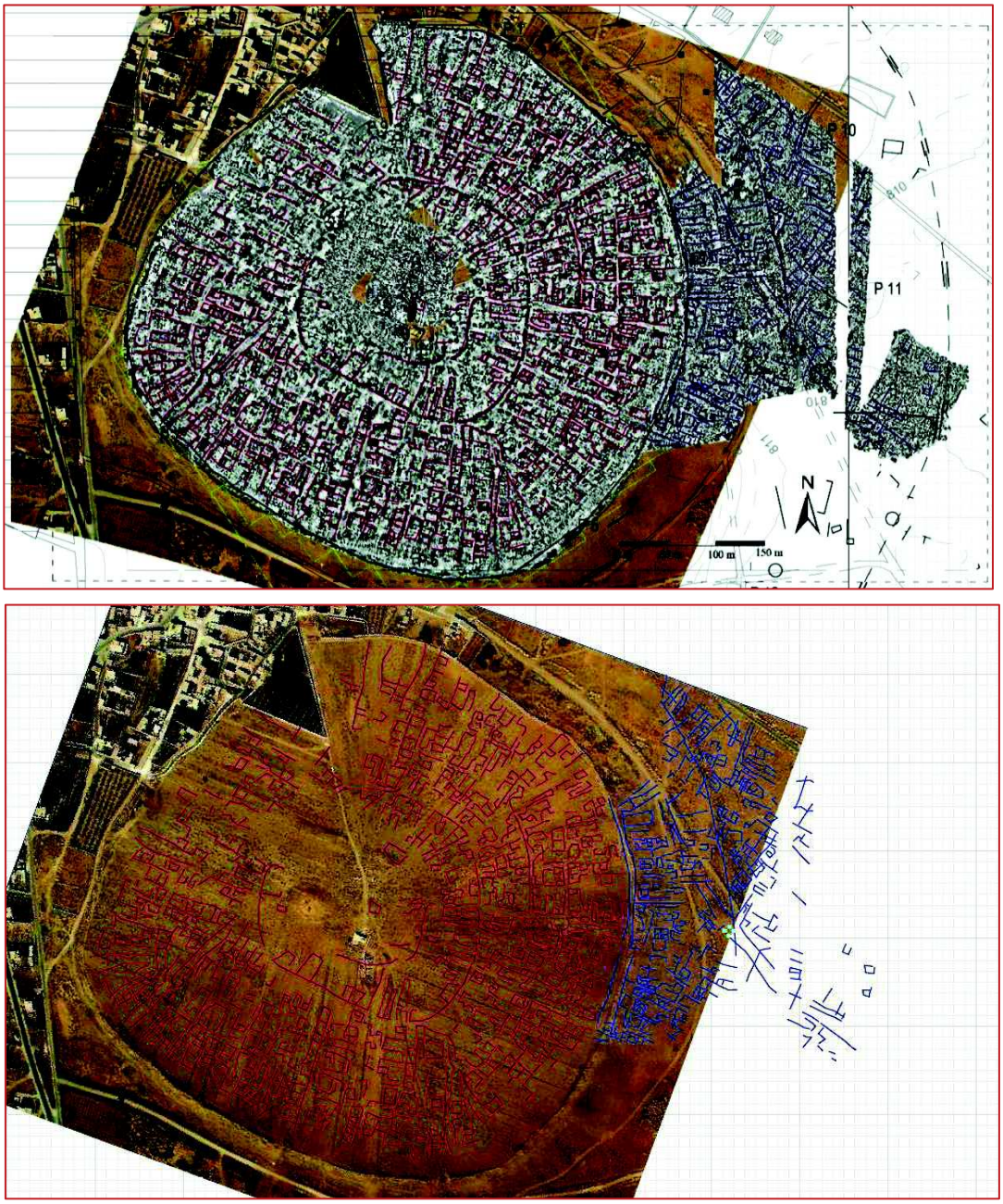


Figure 5.33 ***Carte de dérivée verticale d'ordre 1,5 du site Sh'airat sur fond d'image Google Earth. En haut, interprétation de la carte en bas lignes rouges à l'intérieur de la ville, lignes bleues à l'extérieur de la ville***

On remarque que il y a une ligne dans la zone centrale qui ne prend pas une forme vraiment circulaire et on ne peut ni la décrire comme une forme de cercle ni comme une

forme de carré et elle est assez rectiligne dans sa partie sud. Cette ligne n'est pas forcément une rue mais pourrait être un rempart (Figure 5:34). Elle semble interrompue au nord-ouest et sa continuité n'est pas évidente. Une ou des portes pourraient expliquer en partie l'interruption. (Figure5. 34, à droite).

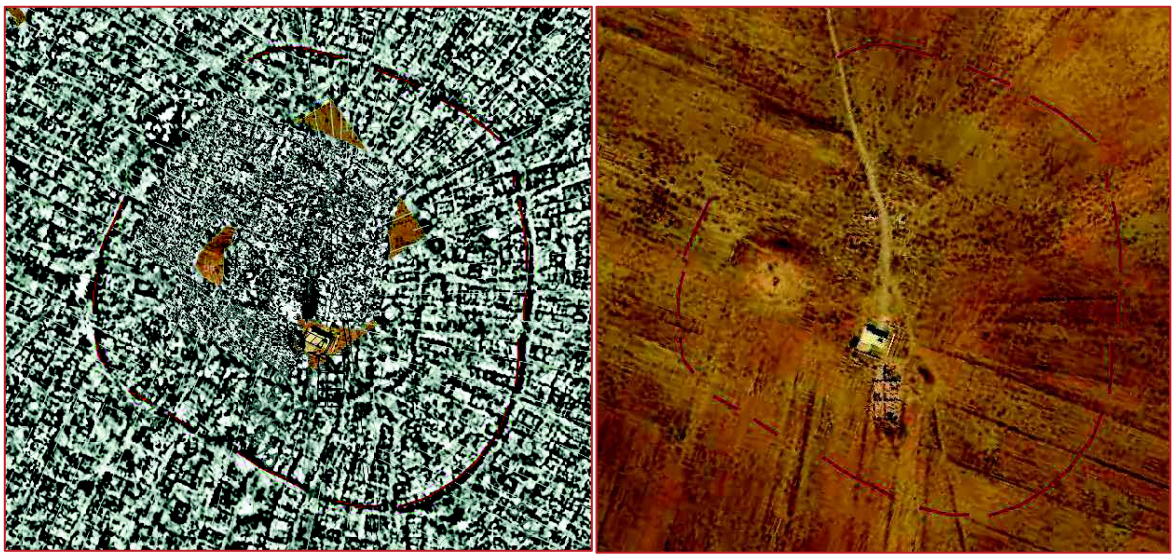


Figure 5.34 ***carte de dérivée verticale d'ordre 1, de la zone centrale du site Sh'airat montrant une ligne de forme plutôt circulaire, qui est probablement un rempart interne.***

On trouve des rues radiales plus ou moins continues et pouvant être interrompues par des portes (Figure 5.35). Plusieurs rues radiales principales sont observées (Figure 5.35). Leur largeur est d'environ 5 m et la rue radiale allant vers le nord-est atteint à la périphérie de la ville une largeur de 10 m. Le même phénomène est observé pour les deux autres rues radiales (Figure 5.35b).

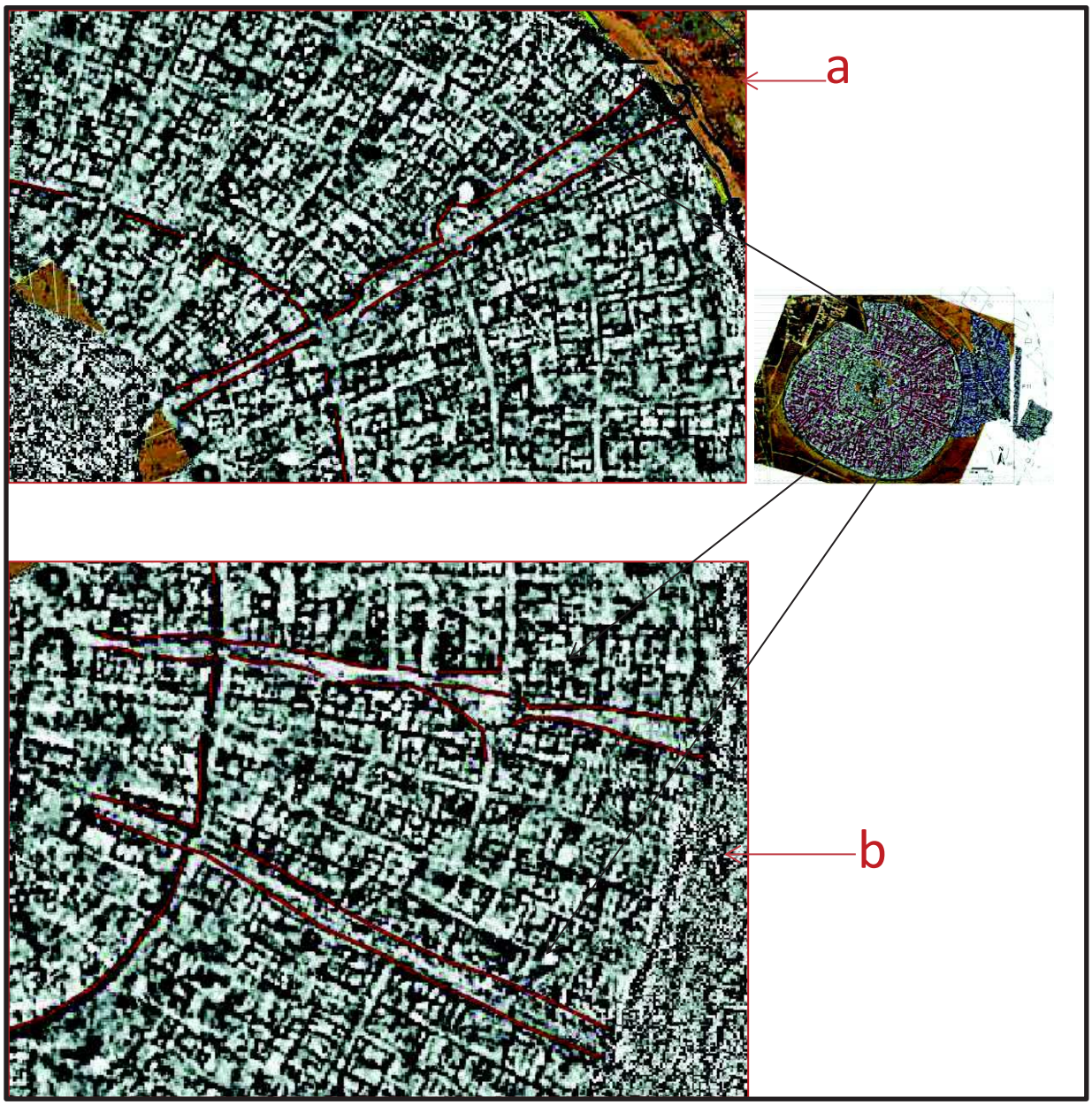


Figure 5.35 ***carte de dérivée verticale d'ordre 1,5 du coté est de la ville haute du site Sh'airat montrant les rues radiales.***

Du coté sud-ouest du tell, on remarque deux rues ou il y a des murs récent perturbant ce secteur. La première ne commence pas dans la zone centrale, mais depuis un espace large derrière le rempart. Sa largeur est environ 10 m (Figure 5.36a). La deuxième rue part de la zone centrale après le rempart et va vers le sud-ouest (Figure 5.36b).

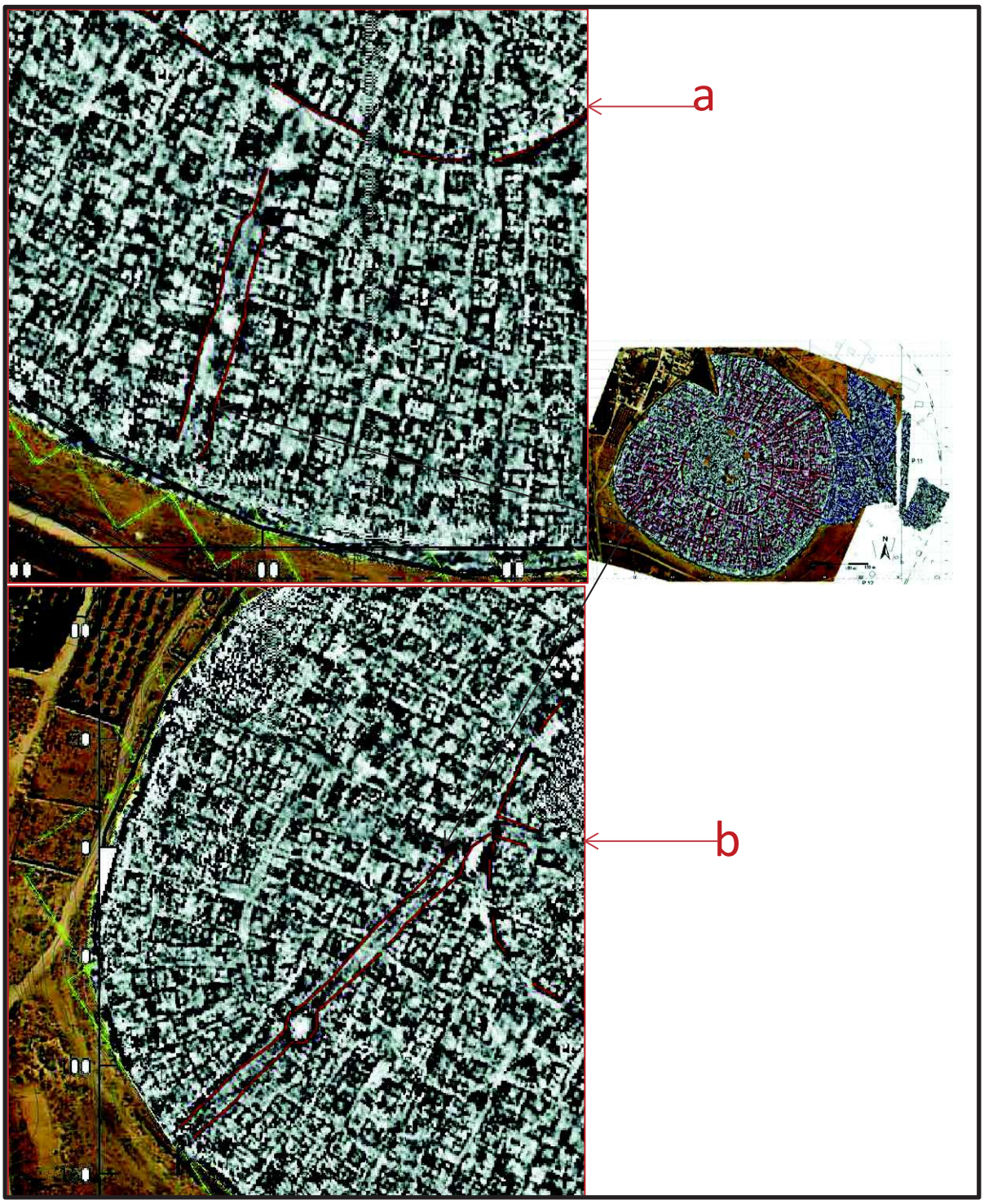


Figure 5.36 *carte de dérivée verticale d'ordre 1,5 du côté sud-ouest de la ville haute montrant deux rues qui n'atteignent pas la zone la zone centrale.*

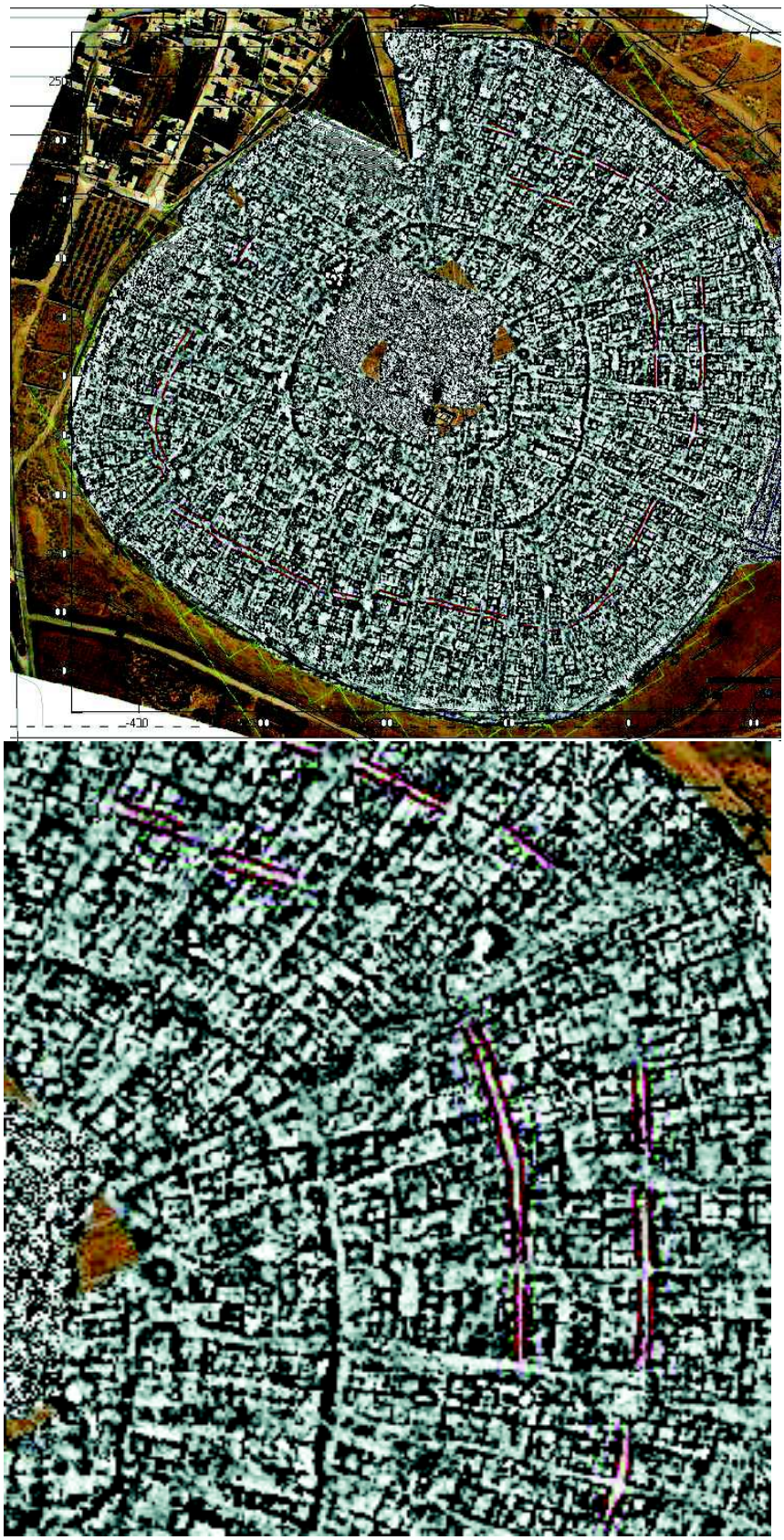


Figure 5.37 ***Carte dérivée verticale d'ordre 1.5 de la ville haute du site Sh'airat montrant des rues circulaires.***

Deux rues circulaires sont assez bien distinguées et elles sont parallèles avec le rempart (Figure 5.37). Les deux rues sont discontinues, interrompues par des rues radiales. Elles semblent plus larges à l'ouest de la ville.

On a vu que les rues dans le site Sh'airat on une largeur variant entre 3 et 10 m, donc les rues sont plus larges que les rues dans le site AL-Rawda. D'autre part à la différence du site Al-Rawda, des espaces ronds sont obervés au milieu de quelques rues et ces espaces n'ont pas de relation avec les intersections entre les rues radiales et circulaires.

La zone centrale est la zone la plus difficile à cartographier (Figure 5.38). Les principales perturbations sont dues à des tombes récentes construites en béton. Dans la zone non cartographiée, se trouve une colline naturelle trop raide pour être parcourue. Au nord-est, on remarque une structure de plus d'une dizaine de mètres de côté. Elle est encadrée par le carré noir sur la figure 5.38.

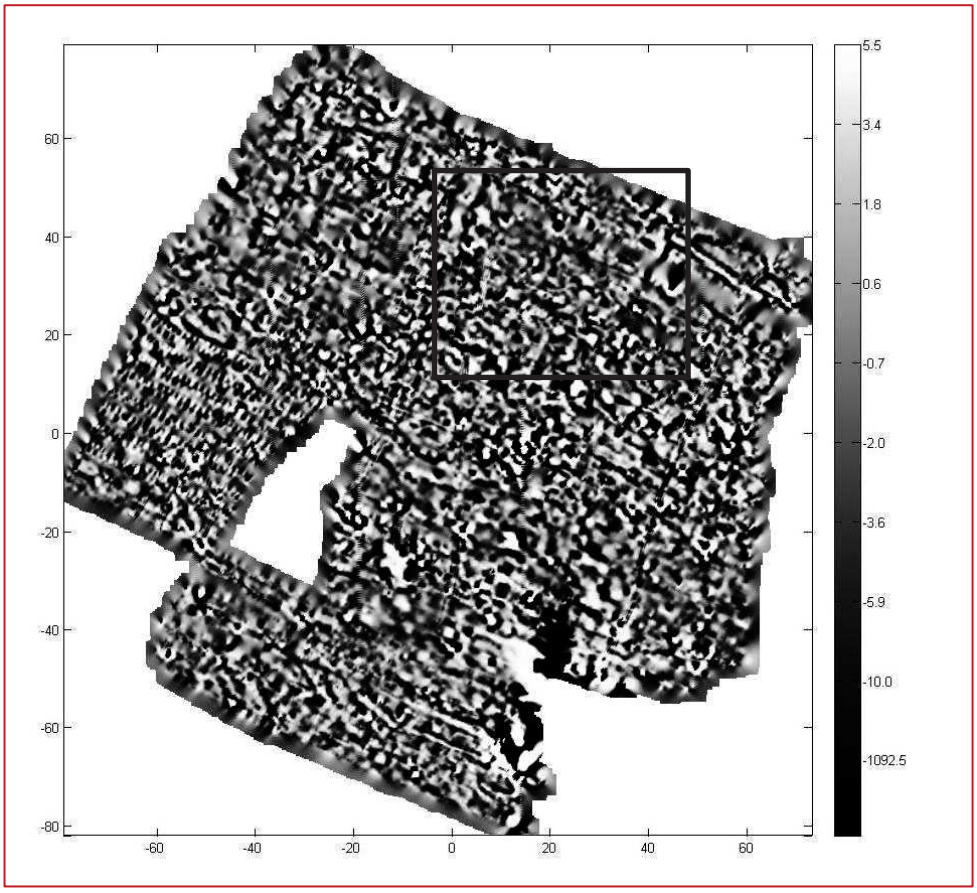


Figure 5.38 ***carte de dérivée verticale d'ordre 1,5 dans la zone centrale de la ville haute du site Sh'airat montrant une structure rectangulaire au nord-est de la zone (encadré par le carré noir).***

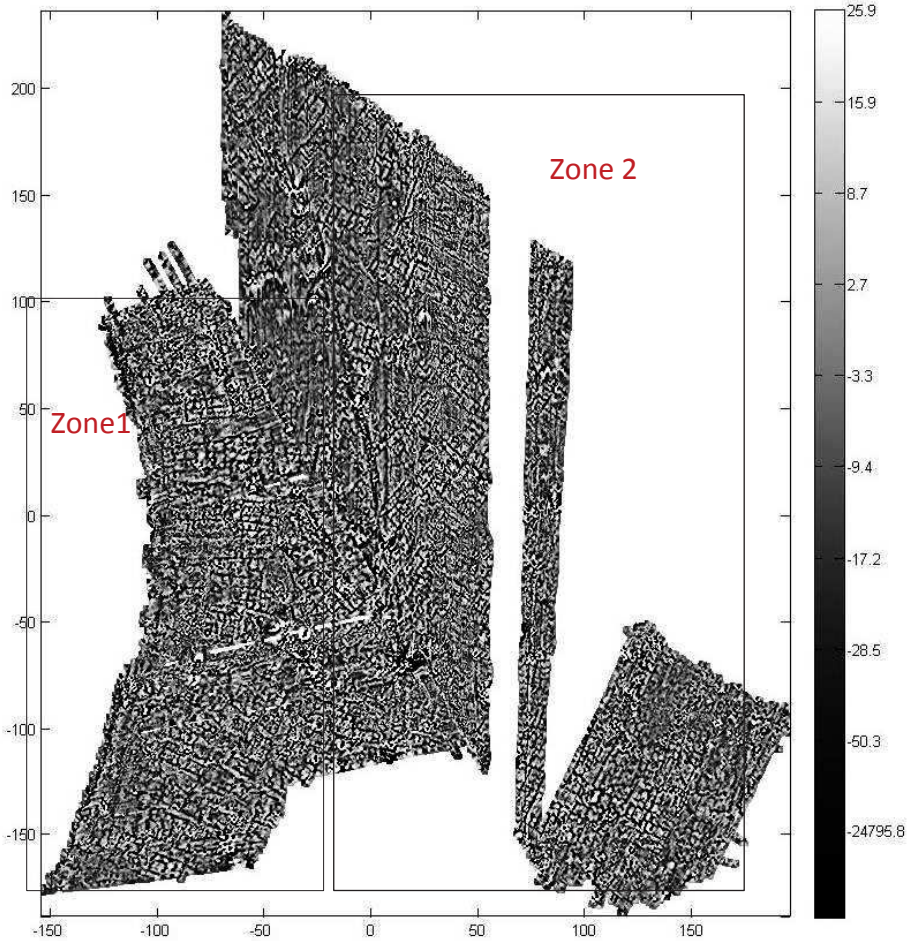


Figure 5.39 ***carte de dérivée verticale d'ordre 1,5 à l'est de la ville bas du site Sh'airat montrant des constructions à l'extérieur du rempart.***

La cartographie dans la zone est à l'extérieur du rempart externe (Figure 5.39) montre des structures bien marquées qui ont un plan très ressemblant à celui de la ville à l'intérieur du rempart. Cela confirme l'hypothèse des archéologues qu'il y a des constructions à l'extérieur du rempart. Pour la zone 1 de la figure 5.40, les directions sont semblables à celles de la ville haute. Pour la zone 2, on observe des orientations plutôt différentes. Le tracé des lignes (Figure 5.40) montre bien cette différence.

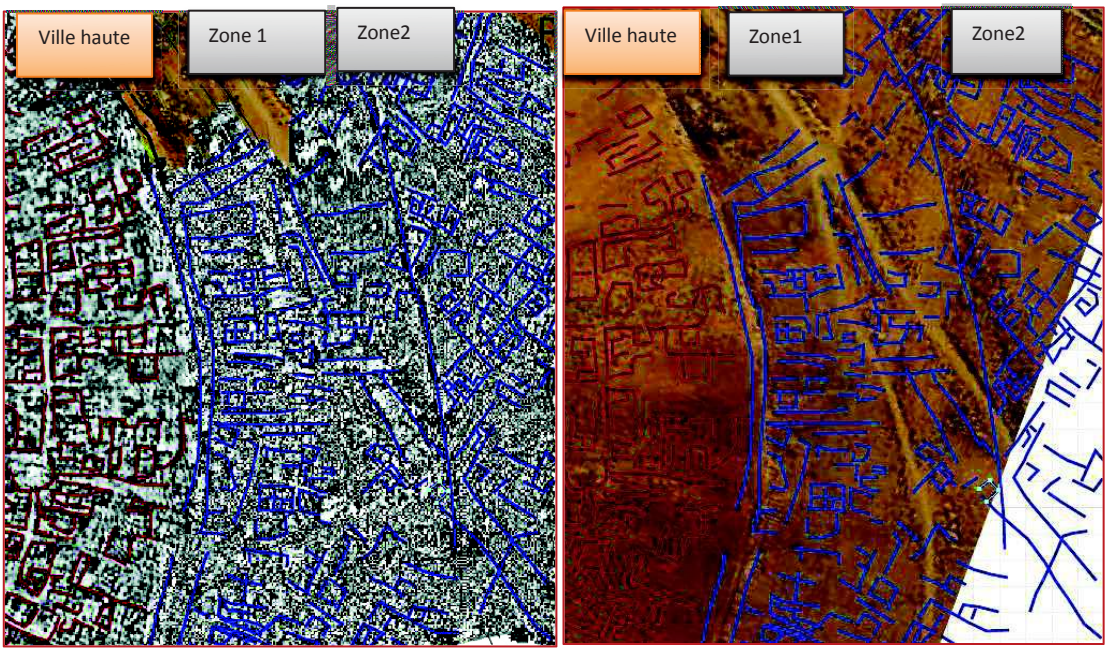


Figure 5.40 ***carte de dérivée verticale d'ordre 1,5 à l'est de la ville de Sh'airat montrant des structures avec directions liées à des constructions dans la ville haute (zone 1) et des constructions avec d'autres directions (zone 2).***

Plus précisément, on relève plusieurs structures de taille importante (Figure 5.41). Par exemple, l'une d'entre elles a une longueur de 30 m et une largeur de 10 m (Figure 5.41a). Un schéma du même type mais d'orientation différente s'observe sur la figure 5.41b avec une longueur de 25 m et une largeur de 15 m. De telles structures sont aussi observées au sud (Figure 5.41c et d).

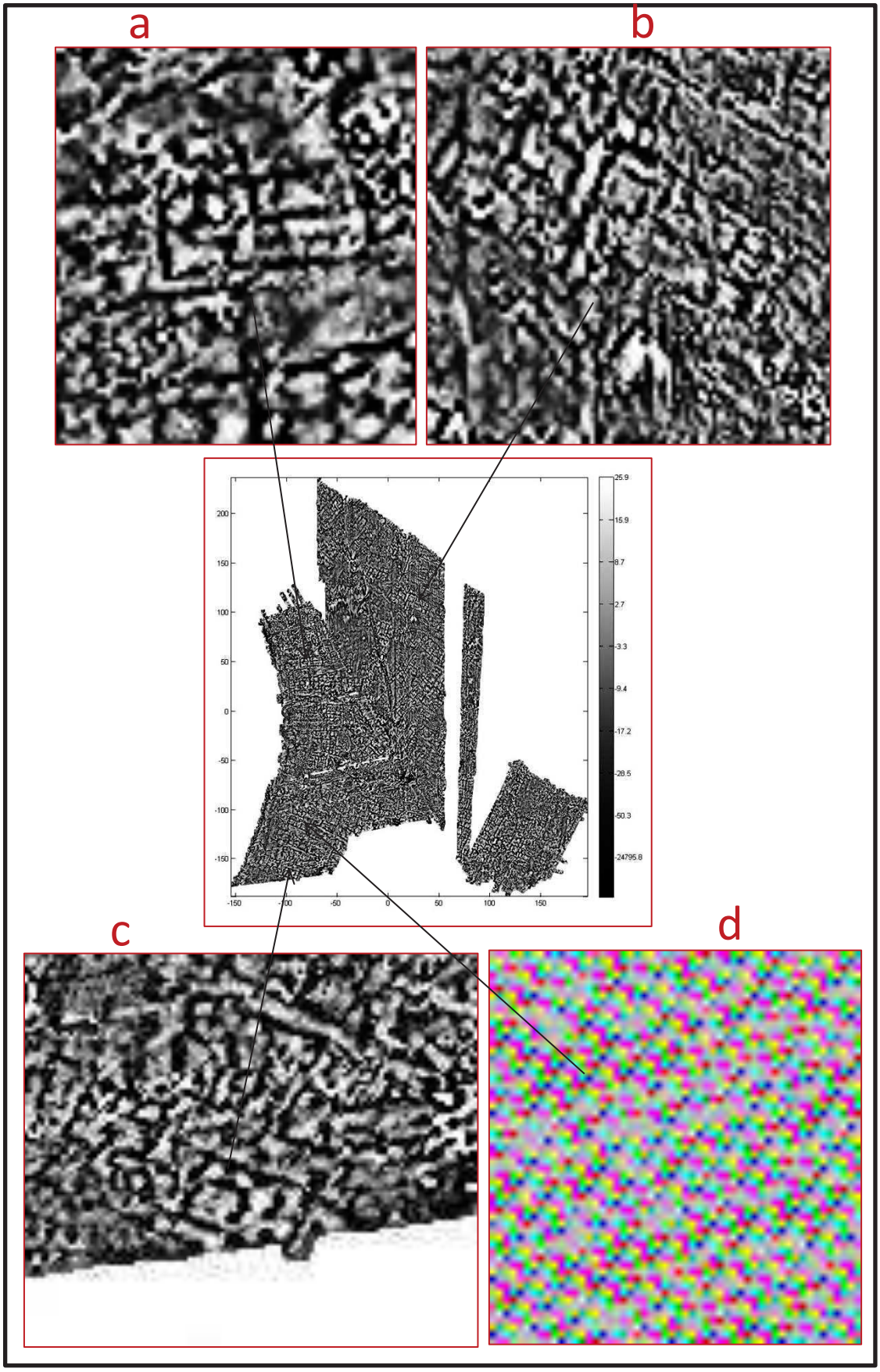


Figure 5.41 ***carte de dérivée verticale d'ordre 1,5 à l'est de la ville Sh'airat montrant la géométrie de plusieurs structures***

Une cartographie magnétique a été faite dans une petite zone au sud-est de la ville pour vérifier s'il y a un deuxième rempart supposé par topographie. La carte de dérivation

verticale obtenue montre deux lignes parallèles. On a superposé la carte de dérivation verticale sur le plan topographique et on voit une bonne analogie entre deux linéations magnétiques et les résultats topographiques ce qui est une bonne présomption de la présence d'un deuxième rempart dans la ville basse du site Sh'airat (Figure 5.42).

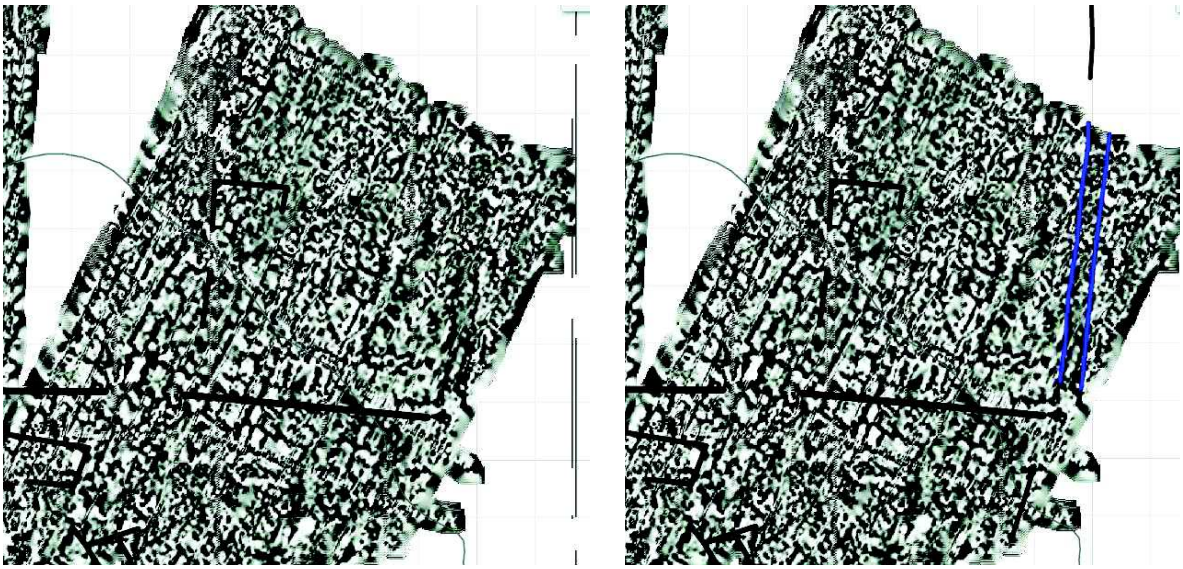


Figure 5.42 ***Carte de dérivation verticale d'ordre 1.5 au sud-est de la ville basse à gauche, superposition de la carte de dérivation verticale sur le plan topographique à droite, montrant la possibilité de l'existence d'un deuxième rempart externe dans la ville basse (lignes bleues).***

17.3. Malhat Ed-Deru

Comme précédemment, on a calculé la carte de dérivation verticale d'ordre 1.5 pour le site de Malhat Ed-Deru et on a obtenu la carte sur la figure 5.43.

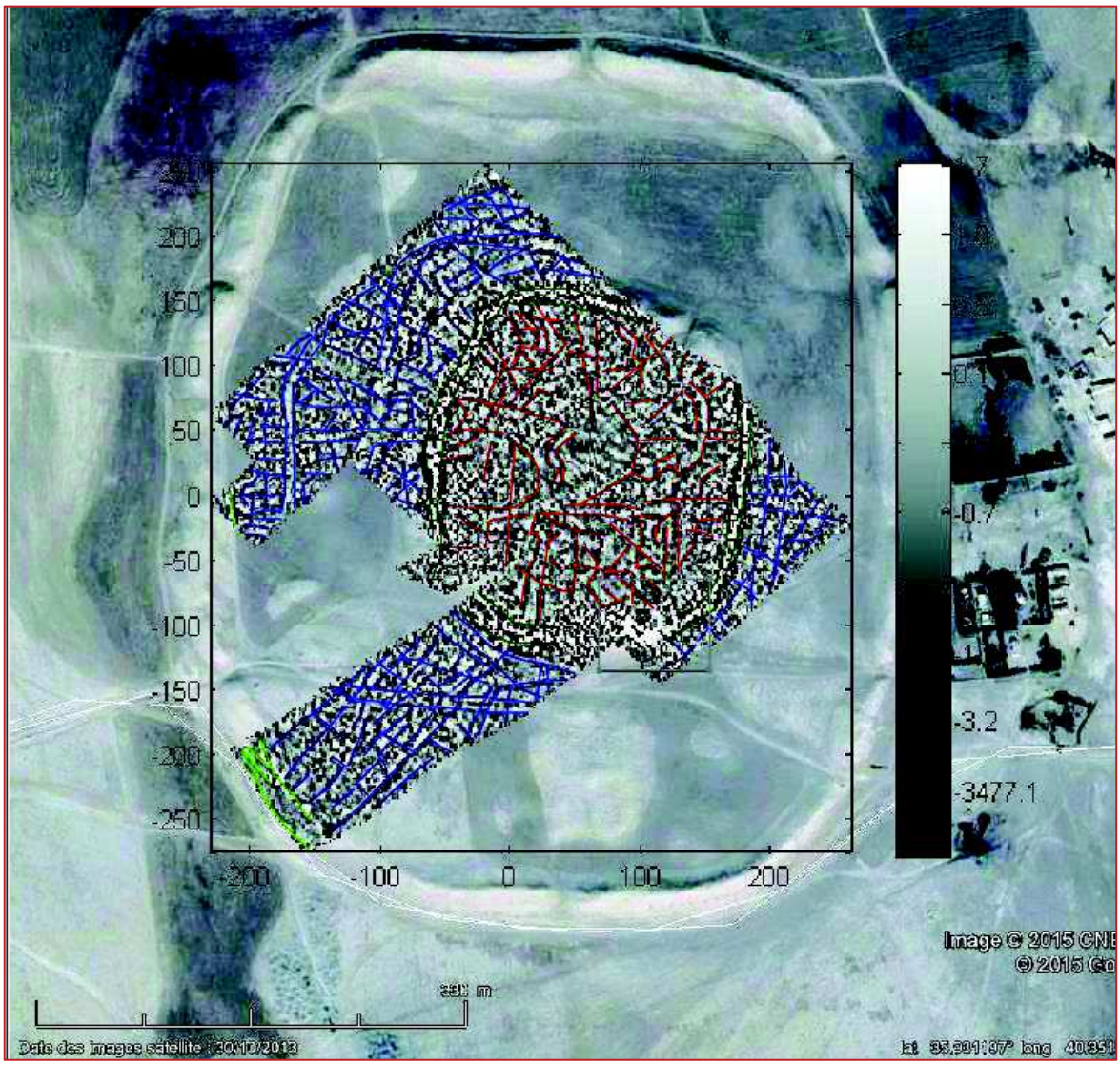


Figure 5.43 ***carte de dérivée verticale d'ordre 1,5 de la ville Malhat Ed-Deru sur fond d'image Google Earth et identification des principales linéations (lignes rouges pour la ville haute, lignes bleues pour la ville basse).***

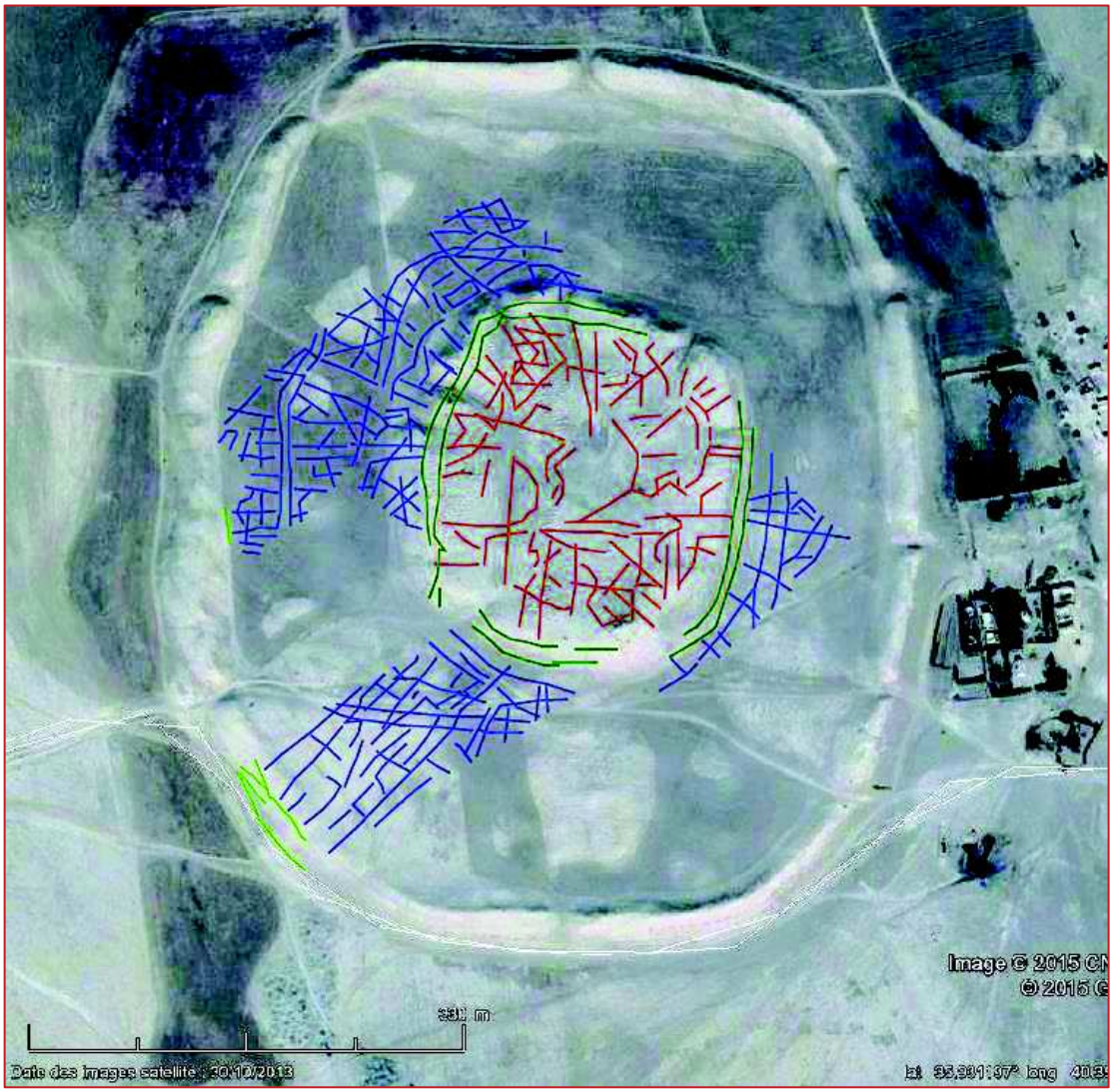


Figure 5.44 ***carte d'identification des linéations magnétiques de la ville Malhat Ed-Deru sur fond d'image Google Earth (lignes rouges pour la ville haute, lignes bleues pour la ville basse, lignes vertes pour les remparts.***

De façon génerale, le plan que l'on obtient de la carte de dérivée verticale pour le site de Malhat Ed-Deru ne montre pas la même organisation que pour les deux autres villes (Al-Rawda et Sh'airat). On peut voir deux remparts l'un interne et l'autre externe, des rues radiales et circulaires, mais généralement l'organisation est mal définie (Figure 5.44).

Sur la carte de dérivée verticale on voit bien le rempart intérieur qui a une forme presque carrée de 200 par 200 m (Figure 5.45). On remarque que la rempart n'a pas la même largeur partout. L'interuption au sud-ouest est avant tout dûe à la forte anomalie magnétique du point géodésique en métal.

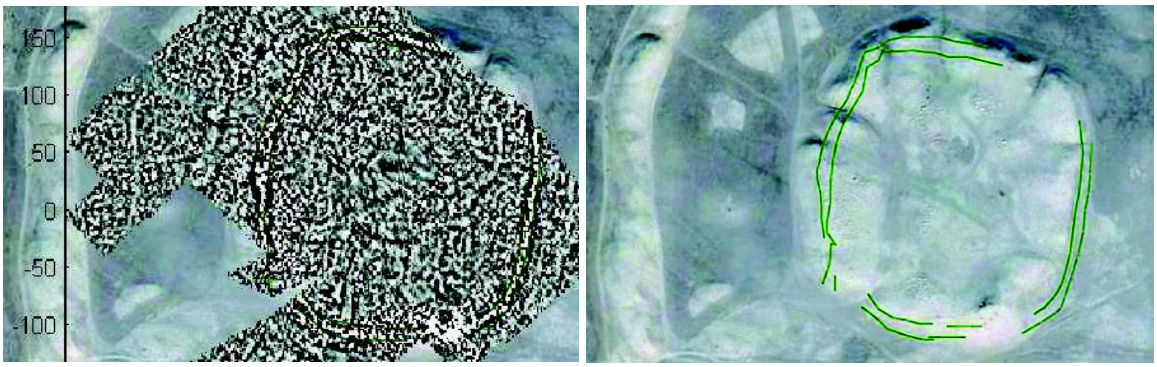


Figure 5.45 ***Carte de dérivée verticale d'ordre 1,5 avec l'interprétation montrant le rempart intérieurde forme presque carrée de 200 par 200 m (lignes vertes).***

Plusieurs lignes radiales partent de la ville haute et continuent dans la ville basse (Figure5. 46). Il s'agirait de rues radiales. Ces lignes ne sont pas complètement rectilignes.

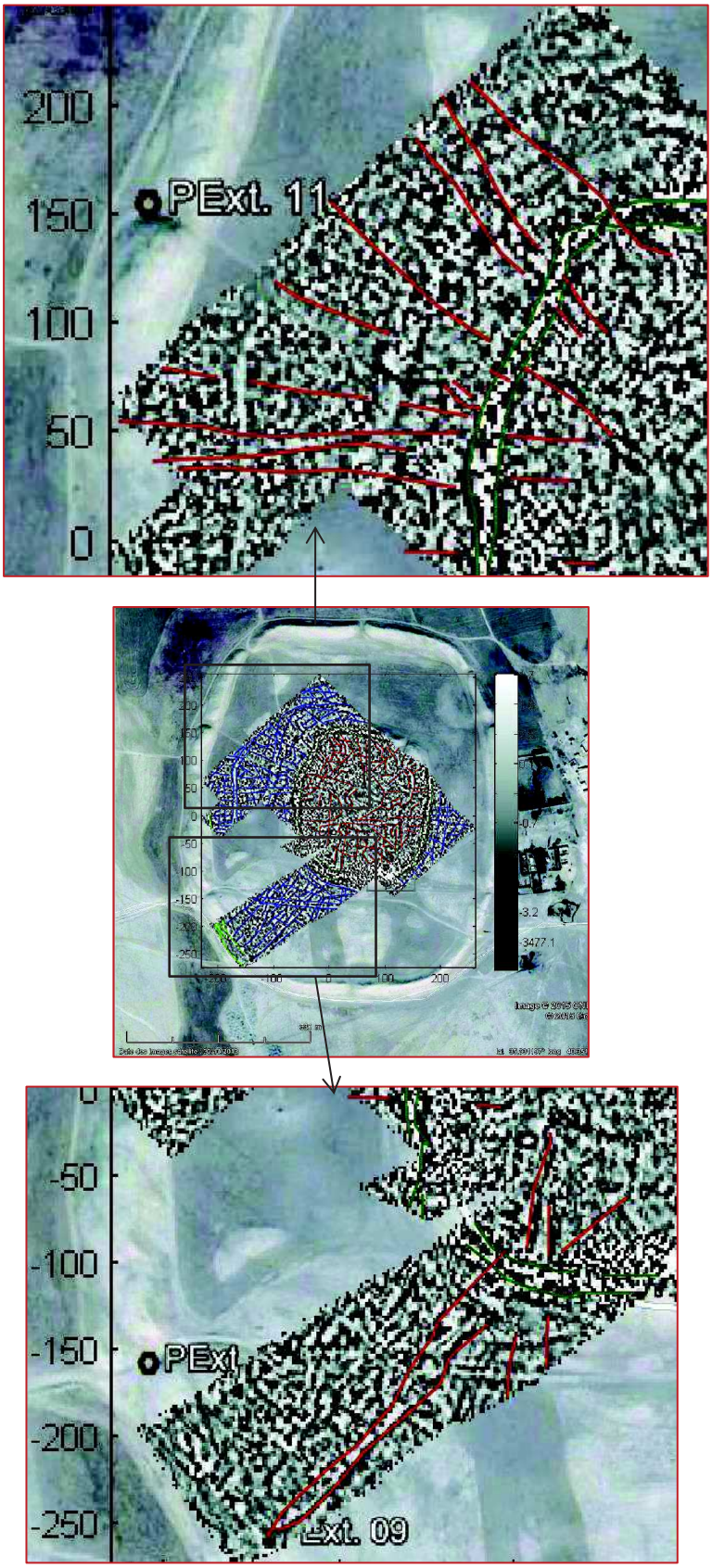


Figure 5.46 *Carte de dérivée verticale d'ordre 1,5 de Malhat Ed-Deru montrant les rues radiales (lignes rouges)*

On observe que ces lignes qui pourraient être des rues radiales, sont souvent en relation avec les portes de la ville hautes (Figure 5. 47).

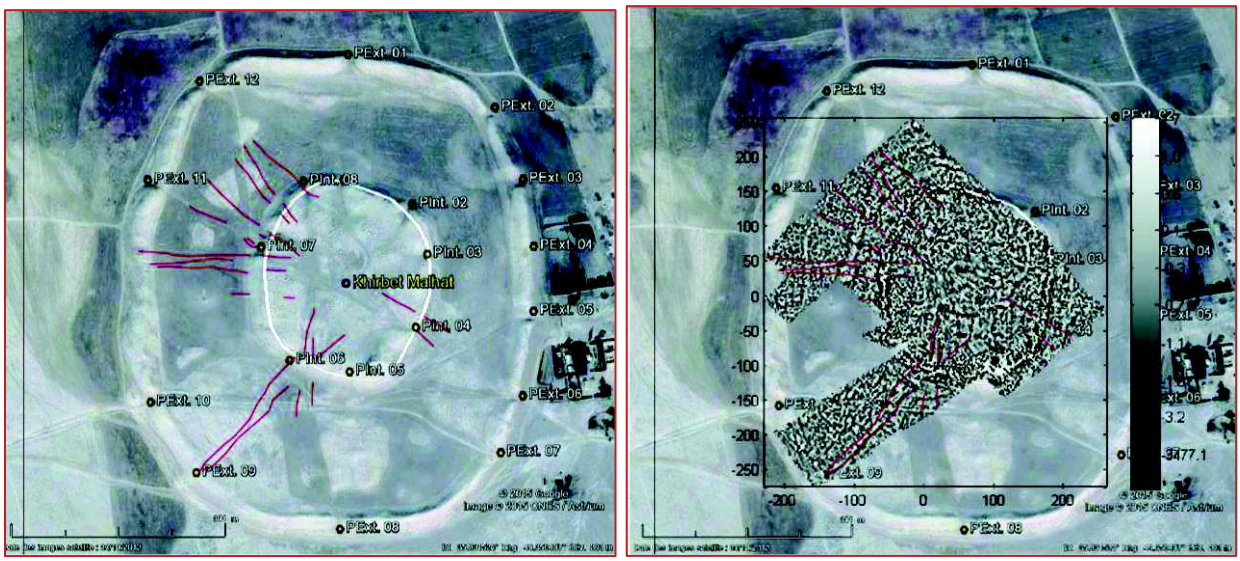


Figure 5.47 ***Les portes de la ville haute de Malhat Ed-Deru définies par Ph. Quenet sur fond d'image Google Earth à gauche. Carte de dérivée verticale d'ordre 1,5 à droite, montrant les portes en relation avec les rues radiales.***

On remarque aussi la présence de quelques lignes circulaires mais uniquement au delà du rempart interne (Figure 5. 48). Deux lignes parallèles apparaissent à l'ouest de la carte et sont parallèles au rempart extérieur. La distance entre les deux lignes est de 5 m environ (Figure 5.48, à gauche).

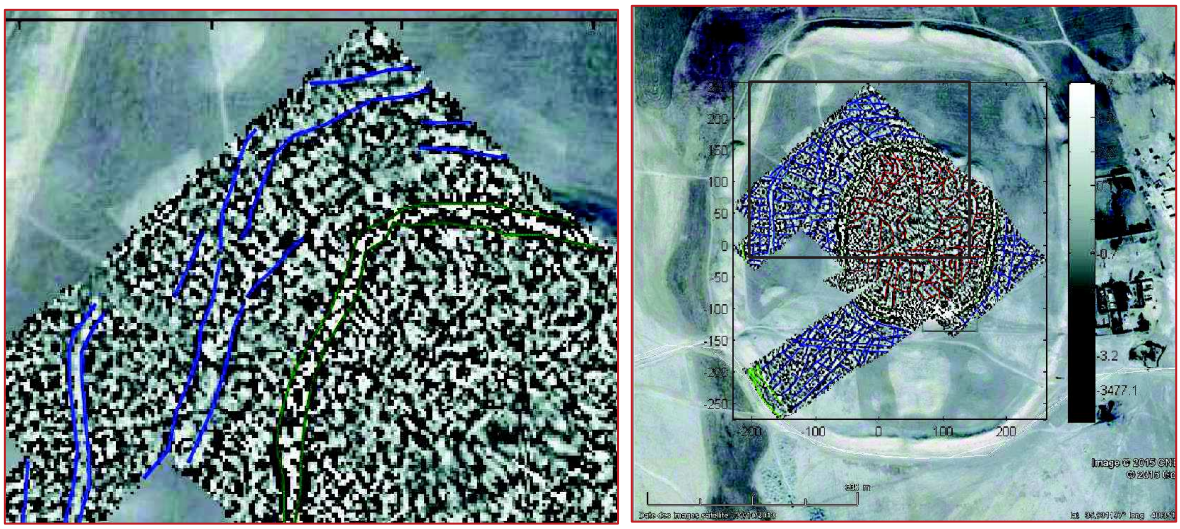


Figure 5.48 ***carte de dérivée verticale d'ordre 1,5 de Malhat Ed-Deru montrant les rues circulaires (lignes bleues).***

Dans la ville basse, on observe des structures qui suivent la direction des lignes radiales et les lignes parallèles au rempart interieur. Elles sont indiquées en bleu sur la figure 5.49.

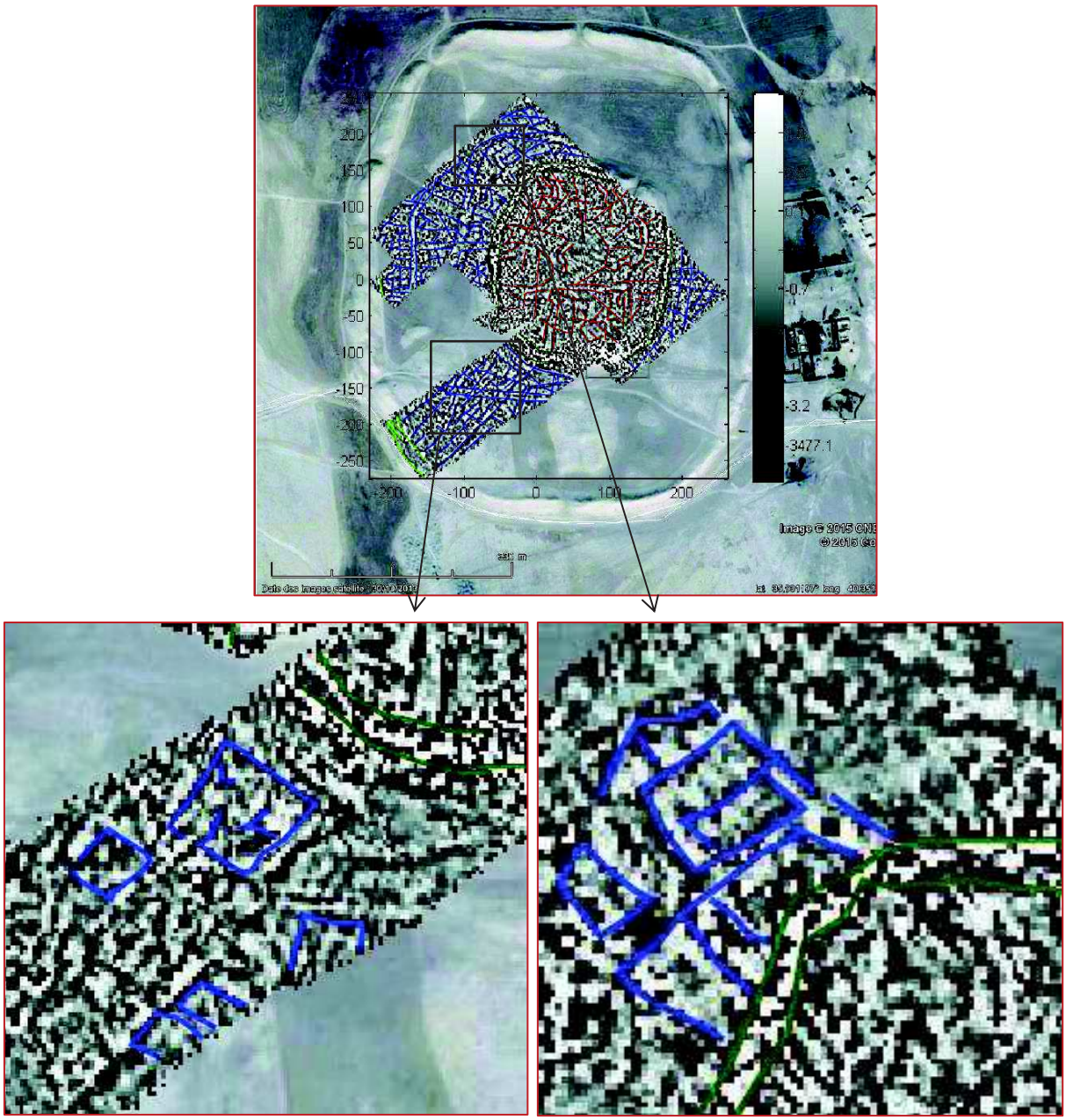


Figure 5.49 ***Carte de dérivée verticale d'ordre 1,5 de Malhat Ed-Deru avec interprétation montrant la possibilité d'existence des constructions.***

Dans la ville haute les structures sont très mal organisées, voire invisibles. Cette désorganisation peut avoir plusieurs raisons. déconstruction de la ville avant d'être abandonnée, ou occupations diverses modifiant les plans, déplacement des blocs de basaltes à une époque assez moderne (Figure 5.50).

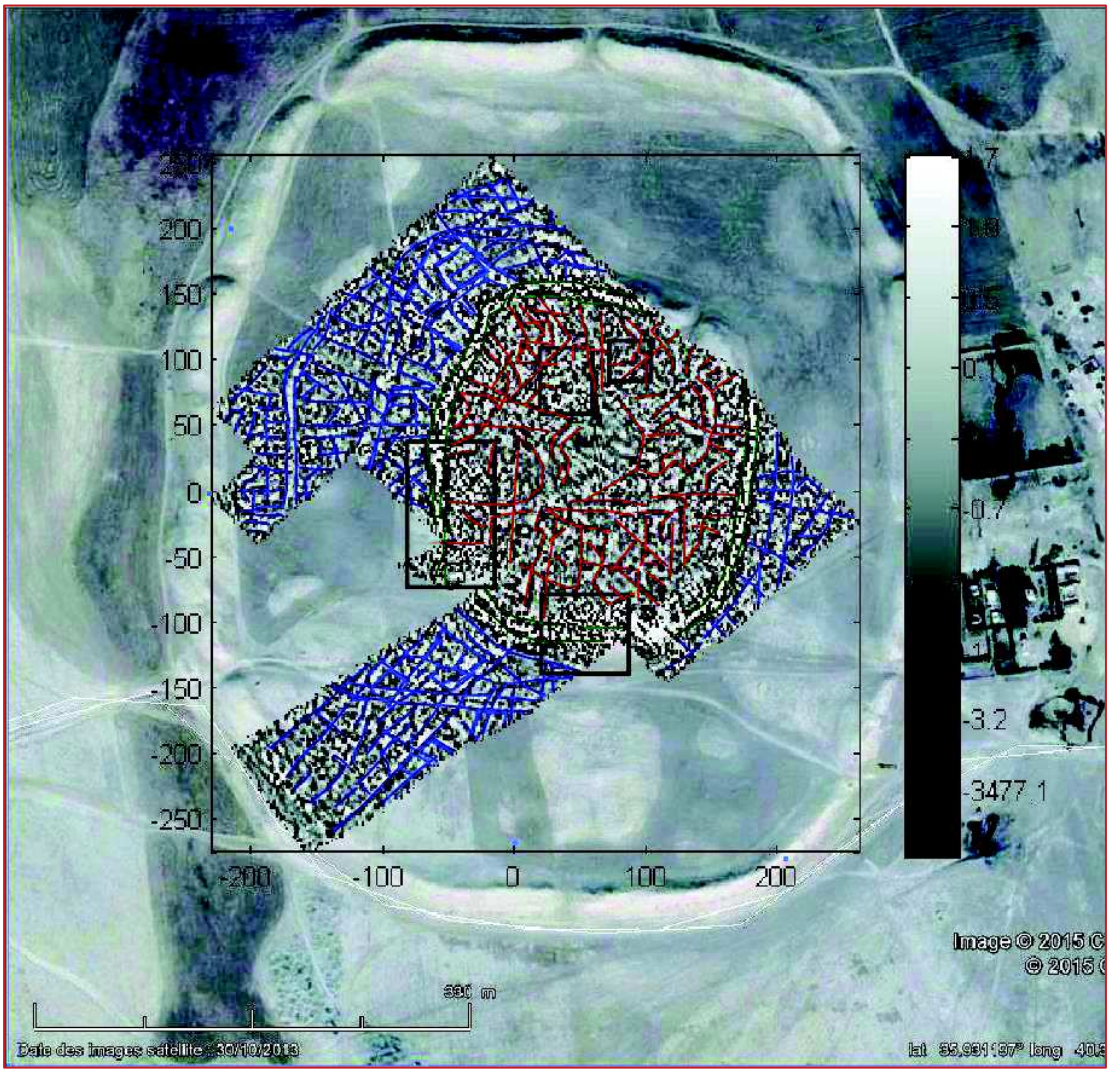


Figure 5.50 ***carte de dérivée verticale d'ordre 1,5 de Malhat-Ed-Deru avec interprétation.***
Les ractangles noirs indiquent la localisation des tombes récentes.

18. Comparaison des cartes de champ magnétique avec la gradiométrie

Étant donné que le système de mesure magnétique de Lyon est constitué de deux capteurs scalaires espacés verticalement de 0,8 m, il est possible de calculer des cartes de champ magnétique et d'en déduire, par un opérateur de méthodes potentielles, le gradient vertical.

J'ai pris les quatre carrés 28, 27, 29 et 30 du tell Al-Rawda, puis j'ai calculé la carte d'anomalie magnétique et la double réduction au pôle pour les deux hauteurs (Figure 5.51).

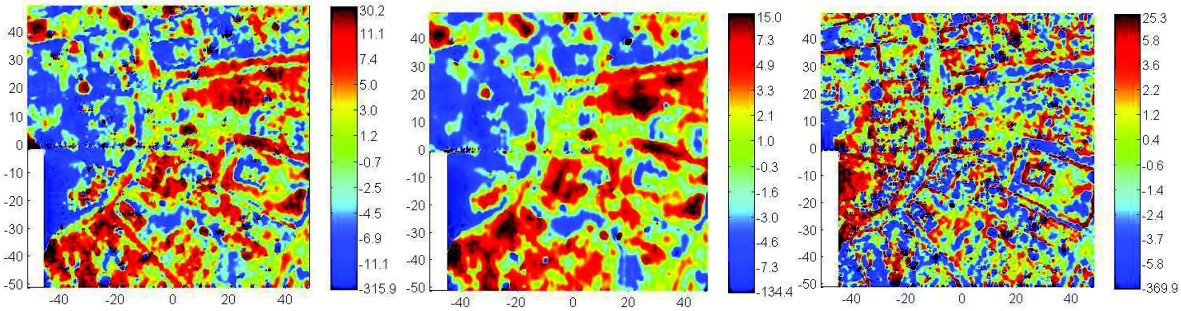


Figure 5.51 ***cartes d'anomalie magnétique double réduite au pôle du capteur bas à gauche du capteur haut au centre et gradiométrie verticale à droite (carrés 27, 28, 29 et 30, site Al-Rawda).***

Comme on pouvait s'y attendre, la carte de gradient vertical montre mieux la structuration de la ville et le temple au sud-est. En revanche si on peut s'interesser à la dérivation des cartes de capteur haut ou bas et voir si elles ne montrent pas mieux la structuration que la carte de gradiométrie. La figure 5.52 montre la comparaison avec des dérivées verticales d'ordre 0,5, 1 et 1,5.

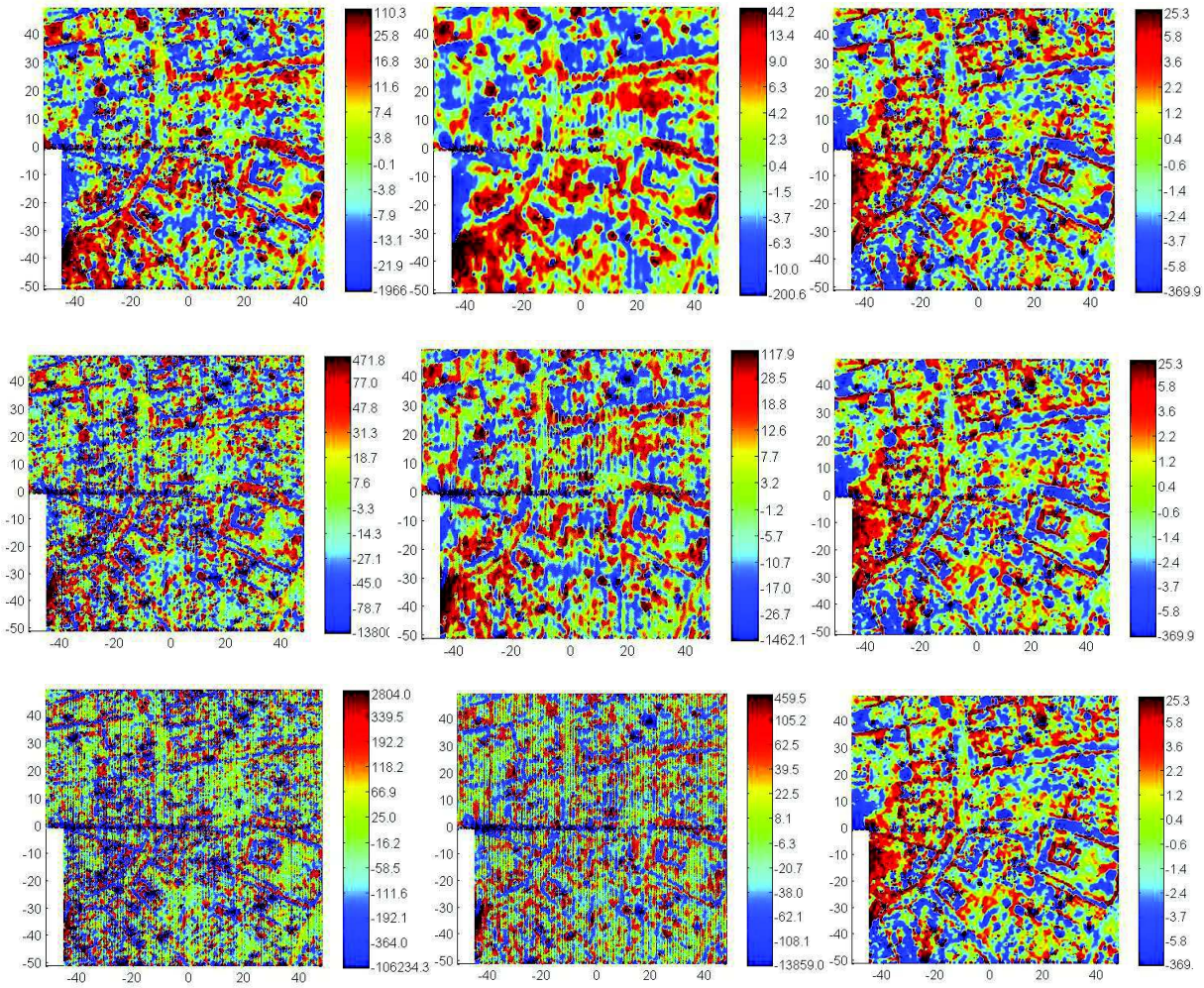


Figure 5.52 ***cartes de dérivée verticale d'ordre 0,5, 1 et 1,5 à gauche pour le capteur bas, au centre pour le capteur haut et gradiométrie verticale à droite. (carrés 28, 29, 30 et 31, site Al-Rawda).***

On observe que les cartes de dérivées, que ce soit avec le capteur haut ou bas, permettent de mieux imager la structuration qui nous intéresse. En augmentant l'ordre de dérivation, du bruit lié au levelling apparait en particulier pour le capteur bas. Cela n'est pas dû à la méthode mais pour l'essentiel à des problèmes liés aux mesures. L'avantage de la gradiométrie permettant de s'affranchir de la variation temporelle n'est finalement pas important pour cet exemple. Par contre, si les mesures avaient été faites avec les deux capteurs espacés de 50 cm horizontalement et non verticalement, on aurait eu une cartographie plus résolutive. C'est d'ailleurs un mode opératoire proposé par le constructeur Geometrics.

19. La modélisation

Dans notre modélisation, on a utilisé le programme *Modgm2D* développé sous *Matlab* par notre laboratoire. Ce programme repose sur les équations de la méthode de Talwani (Talwani et al., 1964) qui permettent de calculer des anomalies gravimétriques ou magnétiques dues à des structures à deux dimensions et de les comparer à des données. Ces structures doivent être polygonales dans le plan vertical. En utilisant ce programme, on peut appliquer les opérateurs soit sur l'anomalie du modèle soit sur les données et on peut également accomplir des inversions de données. L'objet est de faire évoluer la forme du modèle et son aimantation jusqu'à ce que l'anomalie magnétique synthétique corresponde aux données.

19.1. Modélisation de rues à Al-Rawda

À partir des résultats de la fouille dans le secteur 6, réalisée au croisement entre une rue circulaire C2 et une rue radiale R3, on entreprend des modélisations pour essayer de caractériser ces rues à partir des cartes magnétiques (Figure 5.53).

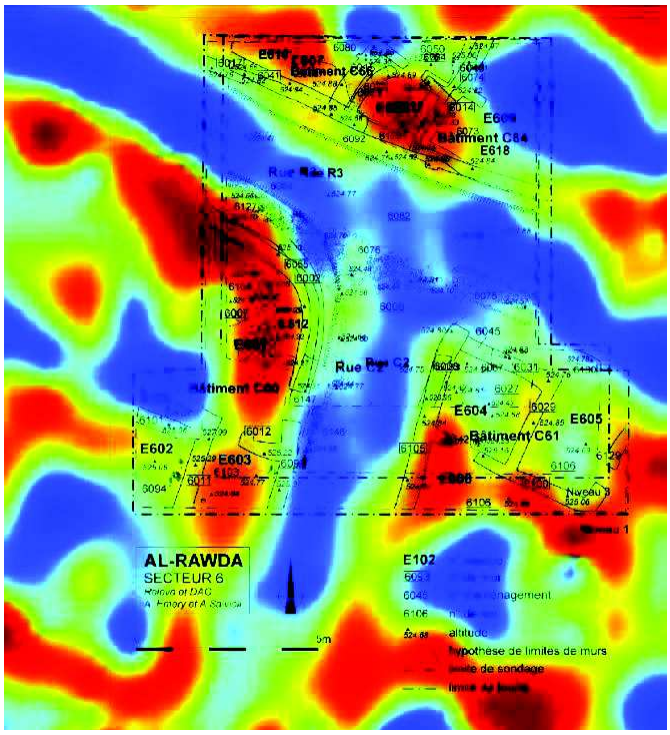


Figure 5.53 ***superposition de la carte de gradient vertical avec le plan des fouilles du secteur 6 dans le site Al-Rawda.***

La figure 5.54 donne les cartes des capteurs et de la gradiométrie pour les carrés 16, 17, 19 et 20 à l'ouest de la ville. On montre également un profil à travers la rue circulaire C2.

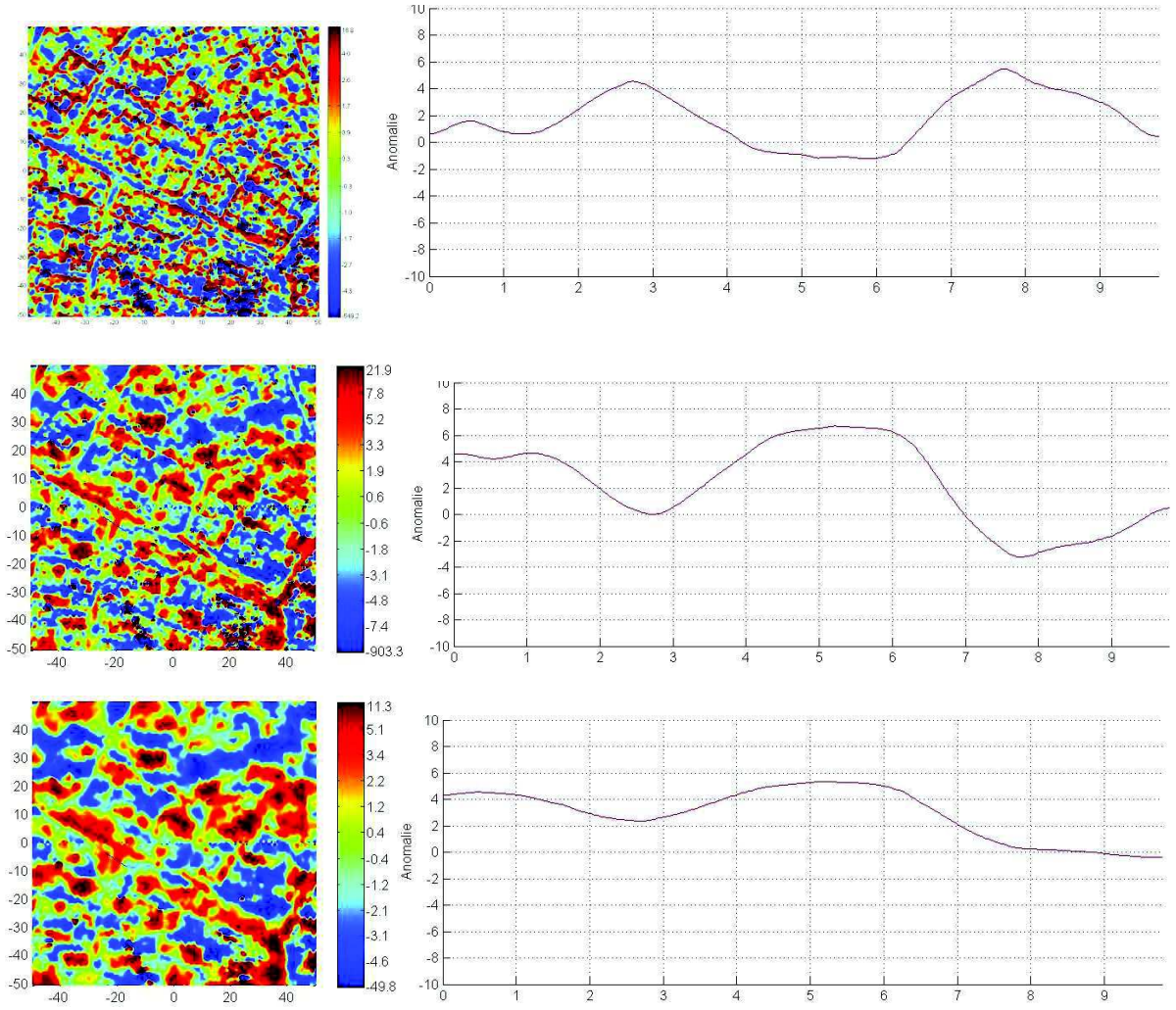


Figure 5.54 ***de haut en bas, carte de gradiométrie, du capteur bas et du capteur haut. À droite profil ouest-est de la rue circulaire C2.***

Comme on l'a vu précédemment, la carte et le profil de gradiométrie montrent mieux la largeur de la rue. Cependant , en faisant de la modélisation des profils de champ magnétique, on montre que l'on peut caractériser la rue circulaire. Pour ce faire, on prend les données du capteur bas dont l'amplitude et la longueur d'onde sont meilleures que celles du capteur haut.

On prend une plaque et on fait varier sa largeur et sa profondeur de manière à obtenir le modèle qui ressemble au mieux au profil de données (Figure 5.55).

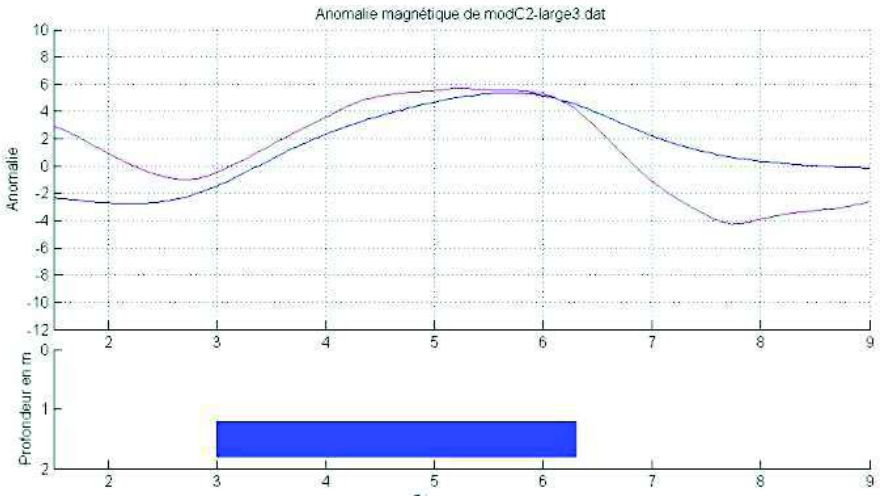


Figure 5.55 ***données magnétiques d'un profil à travers la rue circulaire C2 (en rouge) et champ magnétique du meilleur modèle de plaque (en bleu).***

On observe que l'on n'arrive pas à bien expliquer les données avec un tel modèle quelque soit sa largeur et sa profondeur. Pour arriver à expliquer les données avec un modèle simple, nous ne trouvons pas d'autre solution que de définir deux plus petites structures placées aux bords de la rue (Figure 5.56).

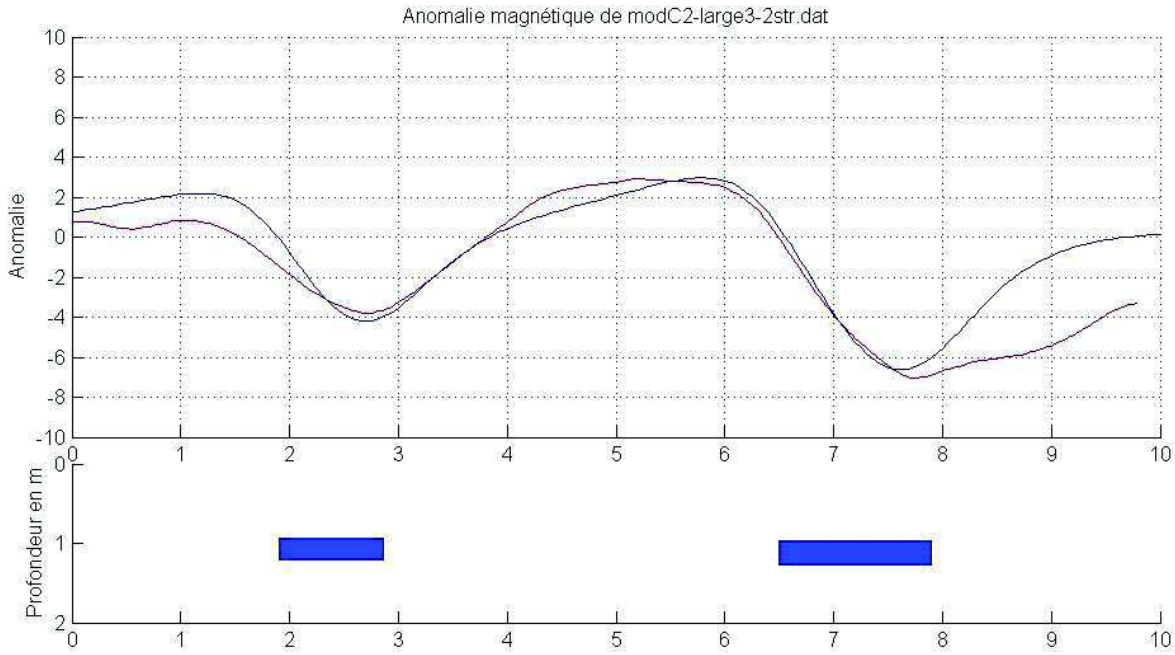


Figure 5.56 ***données magnétiques d'un profil à travers la rue circulaire C2 (en rouge) et champ magnétique du meilleur modèle (en bleu). (meilleur modèle obtenu).***

Le résultat nous parait satisfaisant et il montre que l'on peut établir avec les données de champ magnétique la nature de la rue. L'aimantation est portée par les murs qui la bordent ; la position et la profondeur du toit des murs est un paramètre bien contraint ; par contre la largeur à moins d'importance. Le même exercice est pratiqué sur la rue radiale R3 et on obtient le même résultat (Figures 5.57 et 5.58).

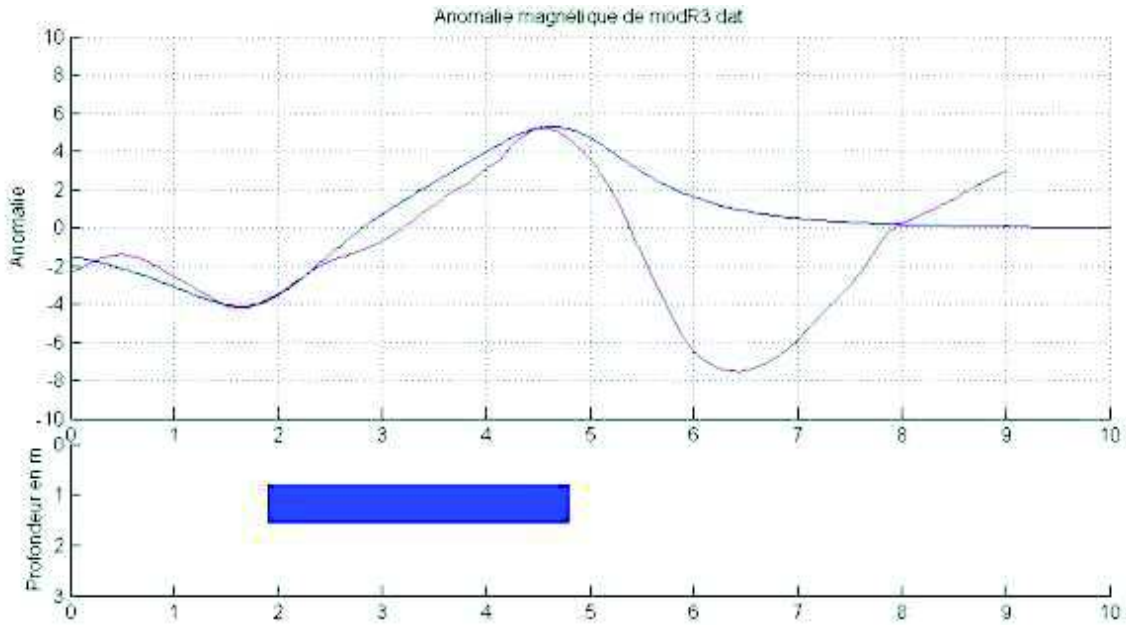


Figure 5.57 ***données magnétiques d'un profil à travers la rue radiale R3 (en rouge) et champ magnétique du meilleur modèle de plaque (en bleu).***

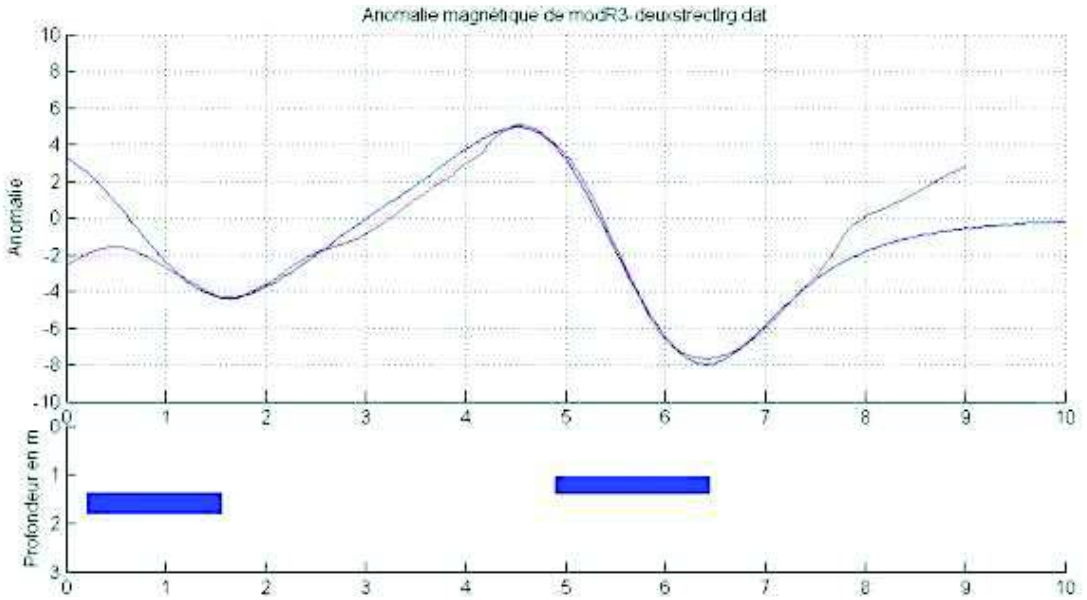


Figure 5.58 ***données magnétiques d'un profil à travers la rue radiale R3 (en rouge) et champ magnétique du meilleur modèle (en bleu). (meilleur modèle obtenu).***

Le plan de fouille dans ce secteur montre trois nivaux ,le niveau 1 est le plus haut puis le niveux deux puis le niveaux trois. La différence entre eux est principalement que le mur 6008 observé aux niveaux 1 et 2 disparait au niveau 3 (Figure 5.59).

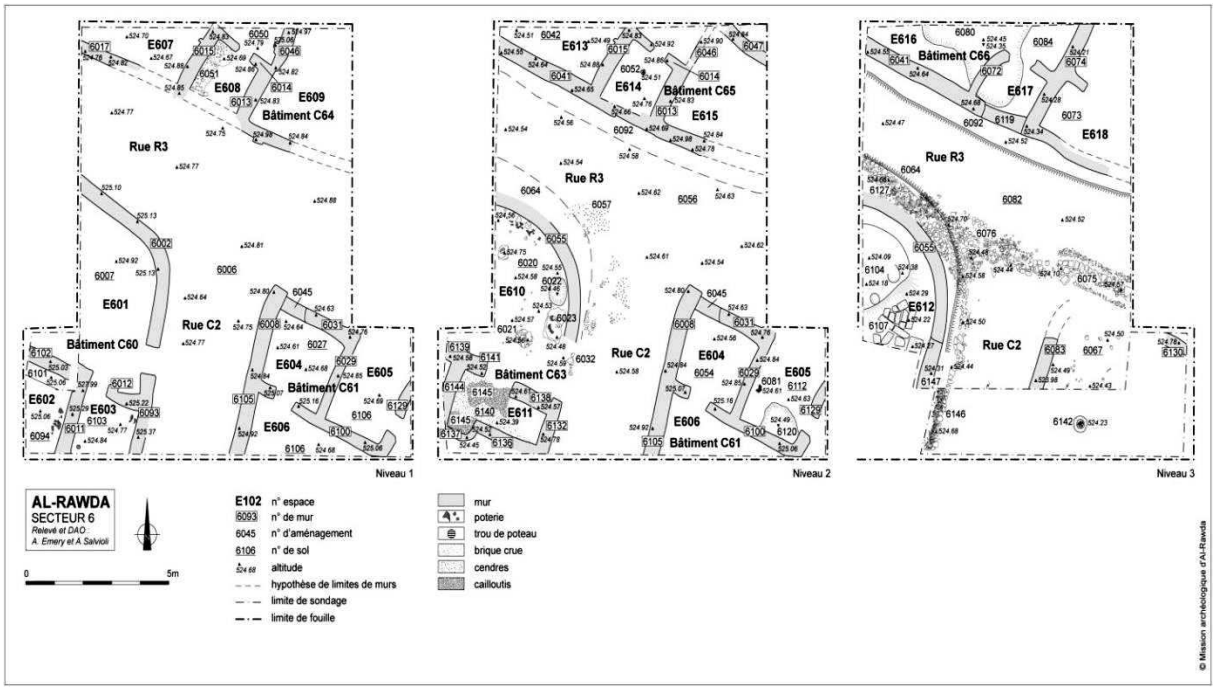


Figure 5.59 ***plans de fouille du secteur 6 des niveaux 1 à 3.***

Afin de mieux comprendre l'effet sur la carte d'anomalie de ces différences en profondeur, on a modélisé en trois dimensions ce secteur à partir des observations dupremier niveau et on a obtenu le modèle de la figure 5.60 (au milieu). Si on compare ce modèle avec la carte de gradient vertical, on remarque que la correspondance est de bonne qualité pour certaines anomalies, par exemple au nord. Par contre, dans la partie sud-est on ne voit pas l'anomalie qui resulte du mur 6008 (Figure 5.60). On a déjà vu que ce mur n'apparait pas dans le plan de fouille au troixième niveau et l'absence d'anomalie pourrait s'expliquer par un soubassement de faible épaisseur ou l'absence de soubassement (Figure 5.61).

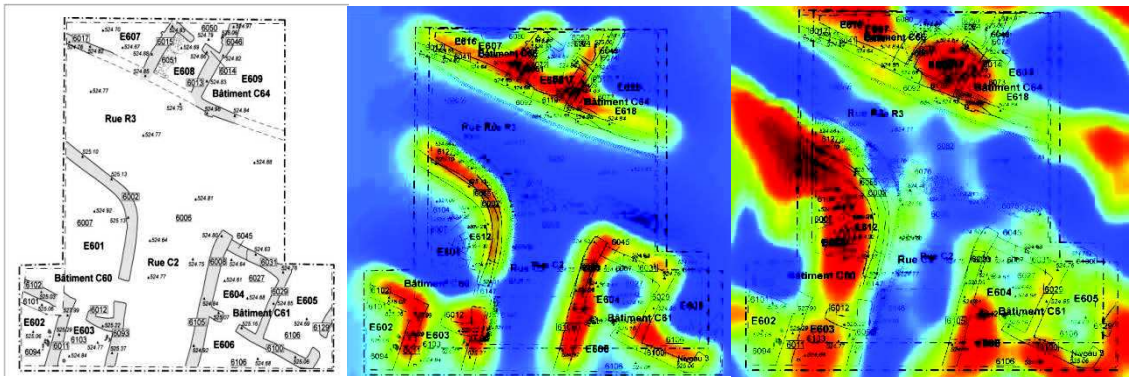


Figure 5.60 ***Plan de fouille du niveau 1 à gauche, superposition de la carte d'anomalie calculée pour une répartition de dipoles à 2 m de profondeur sur le plan de fouille au milieu, superposition de la carte de gradient vertical avec le plan des fouillesà droite.***

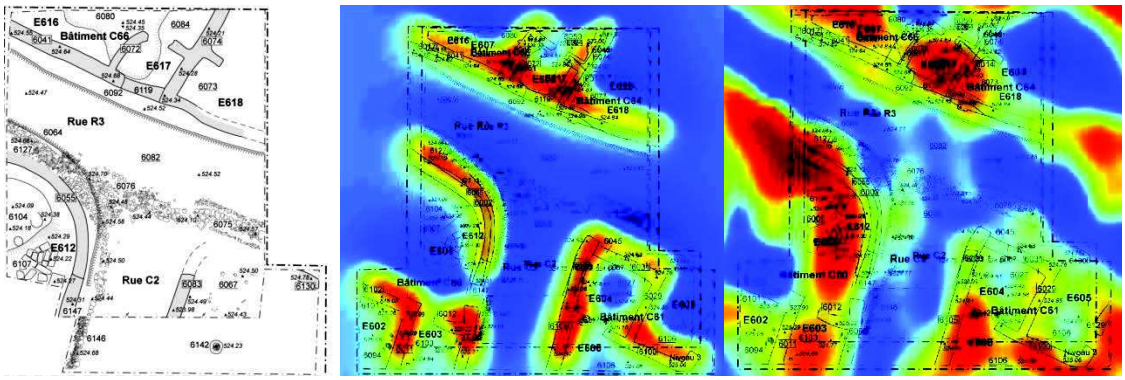


Figure 5.61 ***Plan de fouille du niveau 3 à gauche, superposition de la carte d'anomalie calculée pour une répartition de dipoles à 2 m de profondeur sur le plan de fouille au milieu, superposition de la carte de gradient vertical avec le plan des fouilles à droite.***

19.2. Modalisation de fossés à Al-Rawda

Pour les fossés, la structure est plus étendue qu'une rue de la ville circulaire. On se base sur les résultats des fouilles effectuées dans le secteur 2a (voir chapitre 2) pour modéliser les deux fossés à l'est (Figure 5.62 et 5.63).

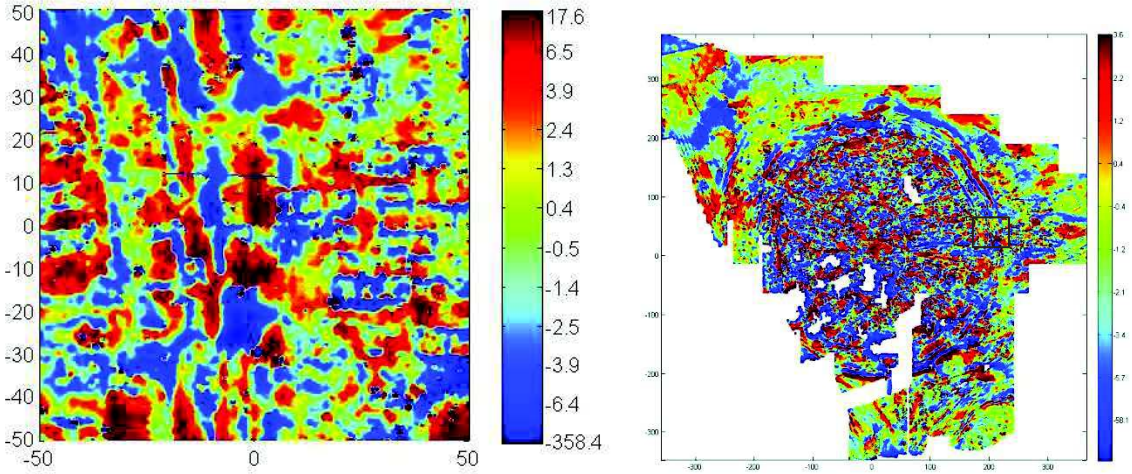


Figure 5.62 ***carte d'anomalie magnétique du capteur bas à gauche pour la zone correspondant au carré noir de la carte générale à droite. Le profil extrait est indiqué par un trait noir.***

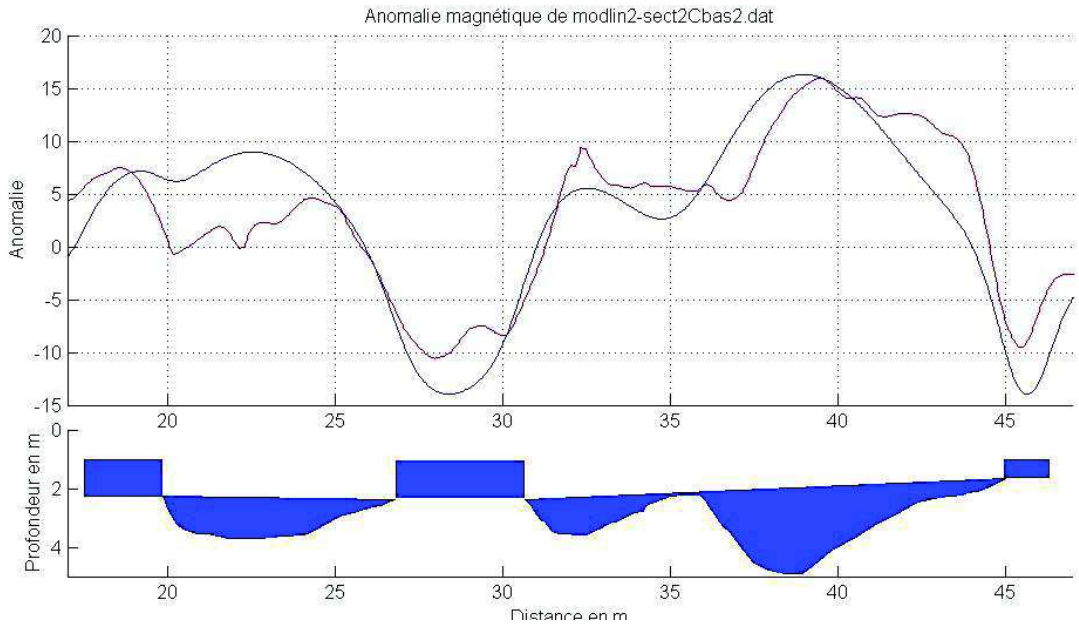


Figure 5.63 ***en haut, données magnétiques du profil à travers les fossés (en rouge) et champ magnétique du modèle issu des résultats de la fouille (en bleu). En bas, coupe verticale correspondant à la fouille.***

Le modèle provient du plan vertical de fouille. Dans ce cas la géométrie est contrainte et la seule possibilité est de faire varier l'aimantation par tâtonnement. On obtient finalement une courbe du modèle assez semblable aux données, sauf à l'ouest ou la correspondance n'est pas de bonne qualité.

19.3. Modélisation de rues à Sh'airat

Pour ce site, on souhaite voir si on peut modéliser les rues circulaires et radiales de la même façon qu'à Al-Rawda. La modélisation avec une plaque fine n'explique pas les données alors qu'avec deux structures sur les bords des rues on obtient de bons résultats (Figure 5.64 et 5.65).

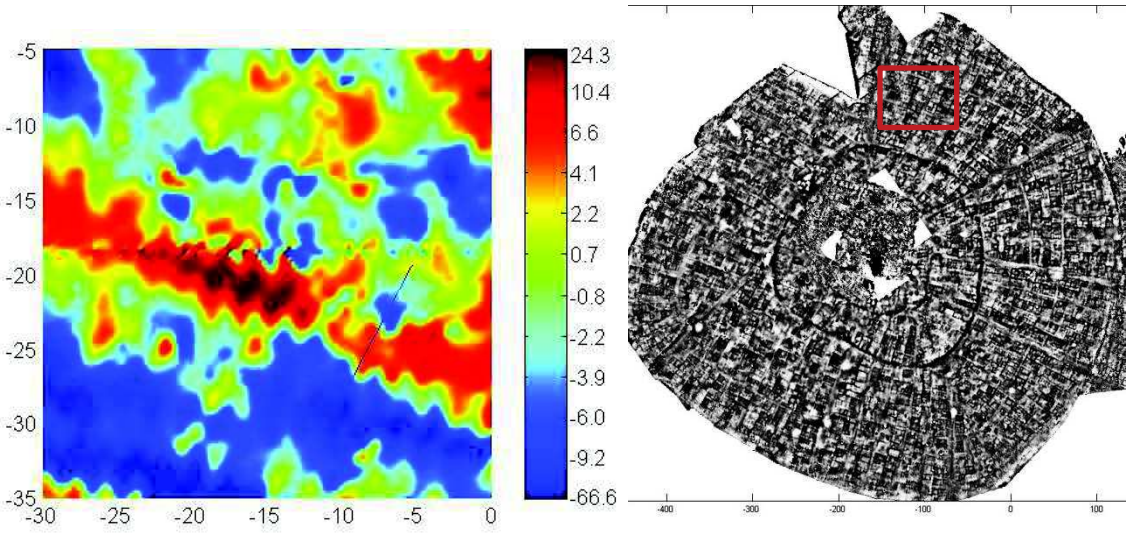


Figure 5.64 ***carte de l'anomalie magnétique du capteur bas et profil extrait pour la modélisation à Sh'airat.***

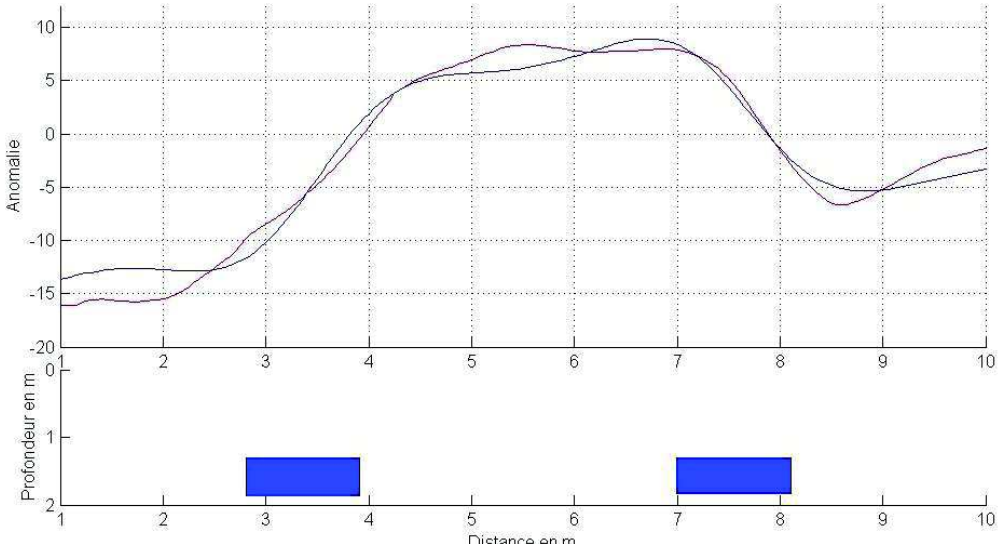


Figure 5.65 ***données magnétiques d'un profil à travers une rue radiale (en rouge) et champ magnétique du meilleur modèle (en bleu). (meilleur modèle obtenu).***

20. Conclusion

En regardant les plans des trois villes issus des cartographies magnétiques (Figures 5.66), on voit bien que les deux sites d'Al-Rawda et Sh'airat ont un plan très bien organisé, ce qui

n’est, de loin, pas le même cas pour le site de Malhat Ed-Deru. Pour les sites de Sh’airat et Malhat Ed-Deru, on observe une ville basse et une ville haute à une altitude moyenne bien différente. Pour le site d’Al-Rawda, on ne voit pas de ville basse et la structuration en dehors de la ville est plus récente.

Les trois sites sont fortifiés par un rempart. La forme du rempart est différente pour le site d’Al-Rawda car elle est bien ronde. Pour le site de Malhat Ed-Deru, la carte magnétique montre que le rempart intérieur est plutôt carré et qu’il est principalement formé d’une fondation ou d’un soubassement de basalte. En revanche le rempart extérieur n’a été cartographié que sur une petite zone, qui est cependant suffisamment grande pour observer que les anomalies magnétiques sont de faible amplitude. Elles attestent de l’absence de fondation en basalte. Pour le site de Sh’airat le rempart est à peu près ovale. Les formes des sites d’Al-Rawda et de Sh’airat ne paraissaient pas si différentes.

Pour les trois sites, on observe des rues radiales et circulaires. Les rues radiales sortent de la zone centrale et continuent vers les portes percées à travers le rempart de la ville. Les rues circulaires sont parallèles au rempart ce qui correspond bien à la notion de villes radioconcentriques avec cependant des variations de forme. Pour le site d’Al-Rawda la largeur des rues est au maximum de 5 m, alors que pour le site de Sh’airat la carte magnétique montre que la largeur des rues peut atteindre 10 m. À Malhat Ed-Deru, les rues sont mal définies et leur largeur semble faible puisqu’elle est d’environ 3 m.

Les cartes des sites d’Al-Rawda et de Sh’airat montrent la présence de grands bâtiments, de plusieurs dizaines de mètres de côté. Ils sont construits selon une organisation sans doute prédéfinie car ils sont bien agencés par rapport aux rues circulaires et radiales. En revanche dans la ville haute de Malhat Ed-Deru, il est difficile de se prononcer sur la structuration en raison principalement de nombreuses perturbations magnétiques.

Nous disposons d’une carte du gradient vertical pour le site de Khuera mais pas des données numériques. La comparaison avec les résultats de nos trois sites ne peut être donc faite qu’en utilisant le gradient vertical (Figure 5.67). On remarque que la ville est plus grande et aussi circulaire. On voit dans la carte des rues radiales et circulaires et on peut reconnaitre le rempart plutôt circulaire, mais la résolution de la carte n’est pas suffisante pour donner des informations aussi détaillées que sur nos trois sites.

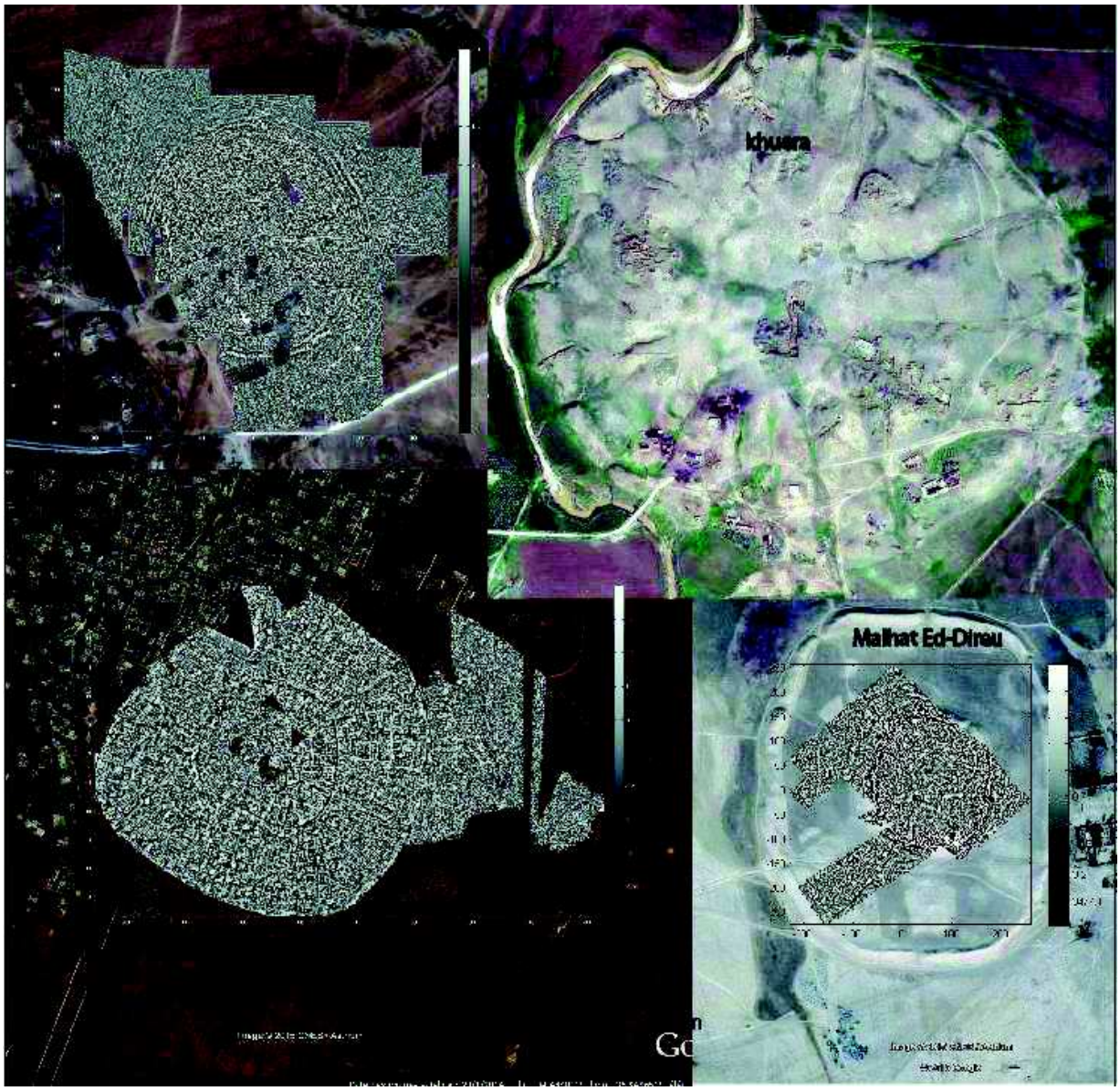


Figure 5.66 ***cartes de dérivée verticale d'ordre 1,5 pour les sites d'Al-Rawda, Sh'airat et Malhat Ed-Deru***

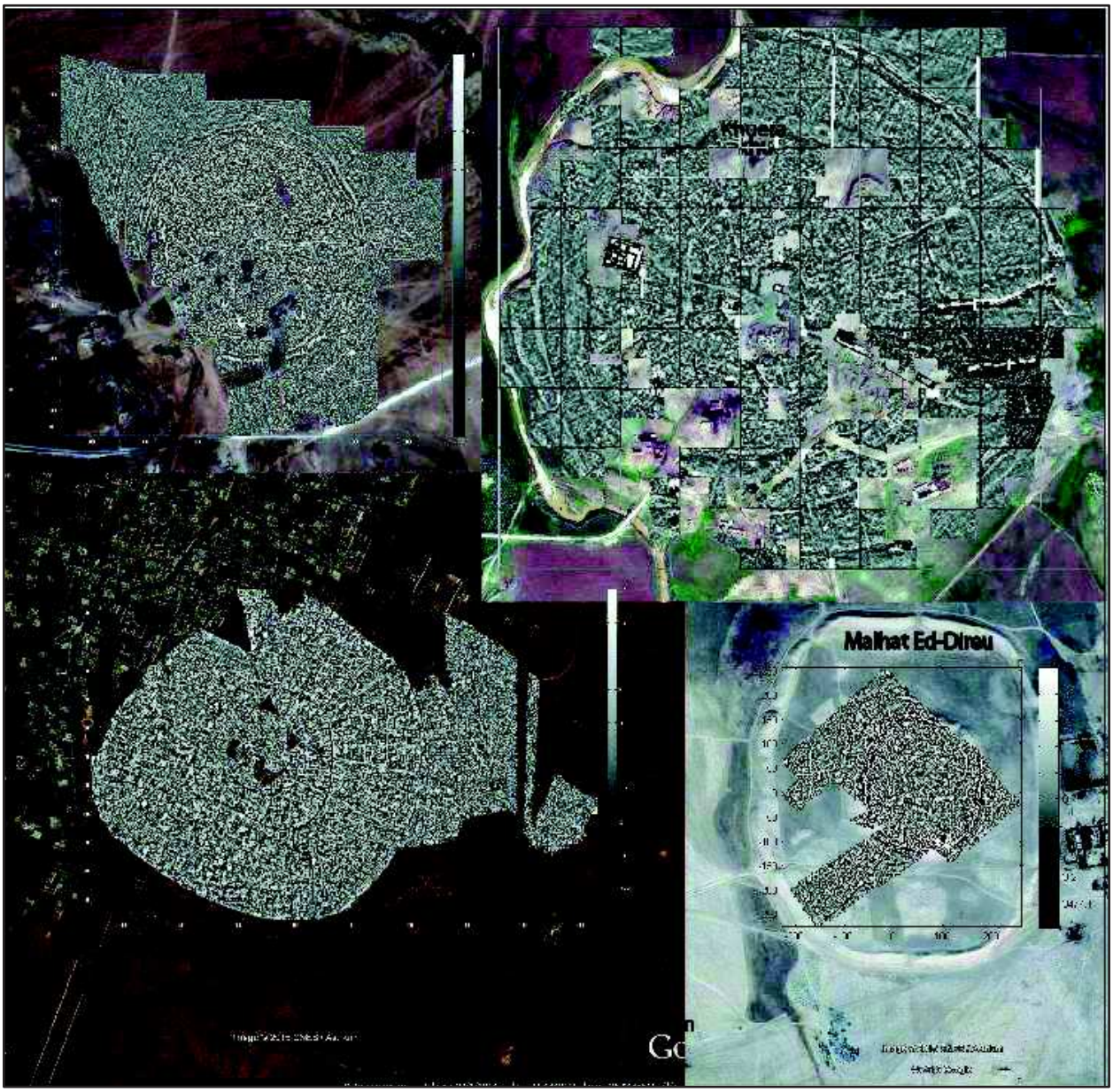


Figure 5.67 *carte de dérivée verticale pour les sites d'Al-Rawda, Khuera, Sh'airat et Malhat Ed-Deru*

Conclusion

Les résultats de ce travail montrent que la méthode magnétique et son interprétation intégrées dans les études archéologiques sont utiles pour étudier les plans d'urbanisme des villes circulaires de Syrie.

Le but était de fournir des plans précis de ces villes, de caractériser l'étendue et l'organisation spatiale du bâti et d'aller plus loin dans les interprétations au sens méthodologique. En particulier d'utiliser les outils des méthodes potentielles pour proposer des modèles plus quantitatifs que ce qui avait été fait auparavant.

J'ai réalisé des cartographies magnétiques pour les trois sites en Syrie (Al-Rawda, Sh'airat et Malhat Ed-Deru) et deux dispositifs ont été utilisés. Sur le site Al-Rawda, on a fait des cartographies dans les zones qui n'avaient pas pu être couvertes avec le dispositif du laboratoire de recherche de Lyon et on a complété les cartographies à l'extérieur du site. Sur le site Sh'airat, on a fait des cartographies dans la zone centrale et à l'est de la ville pour répondre à la question des archéologues concernant la présence de constructions à l'extérieur du rempart externe. Le site de Malhat Ed-Deru n'avait jamais été cartographié

Les cartographies ont tout d'abord été faites à la perche avec quatre capteurs espacés de 0,5 m et à 1 m au-dessus du sol. Ce qui a permis de couvrir de grandes surfaces rapidement. Ensuite la cartographie à la luge avec les capteurs magnétiques trainés à 10 cm du sol et espacés de 10 cm a été utilisée pour la première fois sur le site Al-Rawda. Cette cartographie à la luge a permis d'acquérir de nouvelles données de meilleure résolution ce qui a permis de voir beaucoup mieux la géométrie des structures. Cette méthode est plus lente que la précédente et elle nécessite un terrain assez régulier. C'est pourquoi ce type de cartographie doit être murement décidé en fonction des questions que se posent les archéologues. De façon générale, le magnétomètre utilisé est un capteur vectoriel fluxgate qui permet de compenser des champs magnétiques parasites dus aux équipements portés. La précision des mesures est finalement du même ordre que celle du magnétomètre utilisé précédemment à Lyon (Geometrics G858). Les deux types de cartographies ont été comparées pour les sites d'Al-Rawda et de Sh'airat et j'ai montré que notre système de mesure est plus résolutif. L'ensemble des données a été compilé en une carte magnétique unique pour chacune des

deux sites. La compilation a permis d'aller plus loin dans les interprétations quantitatives. La carte magnétique de Malhat Ed-Deru est la première obtenue pour ce site.

On a vu que la cartographie à la luge nous donne des résultats plus précis qu'avec la perche car les capteurs sont plus proches du sol mais elle nécessite beaucoup plus de temps. Plus récemment on a amélioré la façon de faire les mesures à haute résolution en utilisant une perche inclinée vers le bas avec les capteurs espacés de 10 cm. Cela permet d'aller un peu plus vite mais surtout de passer haut dessus de petits obstacles. L'autre amélioration est l'utilisation d'un système de positionnement Global Navigation Satellite System qui utilise toutes les constellations de navigation et, associé à une base, on obtient une précision de navigation de quelques centimètres par rapport à la base.

Les cartes d'anomalie magnétique obtenues pour les trois sites ont donné une vue générale et précise des villes circulaires. On peut distinguer clairement les rues principales et quelques structures remarquables. Ces cartes permettent aussi de faire des comparaisons entre les trois villes et les matériaux utilisés pour la construction. En particulier, on a montré que les fondations du rempart intérieur dans la ville de Malhat Ed-Deru sont en basalte, ce qui n'est pas le cas pour le rempart extérieur. Il n'y a pas de basaltes pour les sites d'Al-Rawda et de Sh'airat en raison de l'amplitude des anomalies beaucoup plus faible.

L'application des opérateurs de transformation de cartes pour le cas synthétique a permis de mieux comprendre les effets de ces opérateurs sur les structures et a ainsi permis de mieux orienter l'interprétation des cartes des trois sites. On a aussi appliqué ces opérateurs à des profils, l'idée étant de mieux comprendre les géométries sur des structures à deux dimensions plus simples à interpréter. En utilisant la méthode de modélisation à deux dimensions, on a prouvé qu'une anomalie magnétique a toujours trois extrema. En revanche, dans certain cas, le troisième extrema peut être à l'infini et possède une faible amplitude. On a également obtenu des résultats sur la caractérisation de la profondeur de sources particulières. On a vu que pour une structure à deux dimensions de section cylindrique, la distance entre les deux extrema principaux et proportionnelle à la profondeur et que la constante de proportionnalité dépend de la direction de l'aimantation et du champ magnétique régional.

L'ensemble des méthodes de traitement de carte en méthodes potentielles ont été testés sur les cartes des trois sites. L'opérateur de signal analytique a permis de définir la largeur

des rues, environ 3 m. Par contre, avec cet opérateur on ne peut pas définir des rues plus étroites. L'utilisation de l'opérateur de dérivée verticale à différents ordres a permis de montrer qu'à partir de l'ordre 1 on peut mieux définir la largeur des rues qui est la distance entre les deux maxima.

Les meilleurs résultats sont obtenus avec la dérivée verticale d'ordre 1,5. En utilisant cet opérateur, on a obtenu un plan précis pour les deux villes d'Al-Rawda et de Sh'airat. Par contre on n'a pas vu dans le plan de la ville de Malhat Ed-Deru une même organisation. La nouvelle cartographie sur le site Al-Rawda nous a amené à découvrir une structure au sud de la ville qui pourrait être un canal qui desservait la ville. D'autre par l'amélioration de la carte a permis de mieux voir un autre canal à l'ouest de la ville et une rue radiale qui sort de la ville vers le nord-ouest. Sur le site Sh'airat, les résultats obtenu à partir de nos données ont mis en évidence l'existence d'une ville basse à l'extérieur du rempart. On a aussi confirmé un deuxième rempart externe à proximité de la ville basse qui était déjà partiellement observé en topographie. La carte de dérivation verticale du site de Malhat Ed-Deru montre que le site correspond aussi à une ville circulaire avec des rues radiales et circulaires. Par ailleurs les trois villes sont fortifiées avec la présence d'un ou de deux remparts. Leur forme n'est pas la même, Al-Rawda est quasiment ronde, Sh'airata a une forme géométrique moins bien définie et Malhat Ed-Deru est quasiment carrée. Le plan des trois sites montre que Malhat Ed-Deru et Sh'airat contiennent une « ville haute » surmontant une « ville basse ». En revanche, sur le site Al-Rawda la ville basse n'existe pas.

Finalement des modélisations ont été faites en deux dimensions. Les résultats obtenus montrent que ce n'est pas les rues qui sont observées mais les murs qui les bordent. La modélisation 3D a confirmé ces résultats, mais elle reste à développer. Viendra ensuite l'inversion des données guidée par ces modélisations. L'objectif initial de la thèse était de transformer mathématiquement les cartes magnétiques en une répartition en trois dimensions des sources aimantées du sous-sol permettant de quantifier préciser les murs et leurs fondations. Nous avons progressé dans cette voie, mais vu certaines difficultés rencontrées l'objectif sera encore long à atteindre.

Bibliographies

Abbas, M,. Abdallatif, T,. Shaaban, F,. Salem, A ,. et Suh M. 2005. "Archaeological Investigation of the Eastern Extensions of the Karnak Temple Using Ground-Penetrating Radar and Magnetic Tools." *Geoarchaeology* 20 (5): 537–554. doi:10.1002/gea.20062.

Acuña, M.H. 2002. "Space-Based Magnetometers." *Review of Scientific Instruments* 73 (11): 3717. doi:10.1063/1.1510570.

Arciniega-Ceballos, A,. Hernandez-Quintero, E,. Cabral-Cano, E,. Morett-Alatorre, L,. Diaz-Molina, A,. Soler-Arechalde, A,. et Chavez-Segura R. 2009. "Shallow Geophysical Survey at the Archaeological Site of San Miguel Tocuila, Basin of Mexico." *Journal of Archaeological Science* 36 (6): 1199–1205. doi:10.1016/j.jas.2009.01.025.

Arkani-Hamed, J. 1988. "Differential Reduction-to-the-Pole of Regional Magnetic Anomalie." *Geophysics* 53 (12): 1592–1600.

Arkani-Hamed, J. 2007. "Differential Reduction to the Pole: Revisited." *GEOPHYSICS* 72 (1): L13–20. doi:10.1190/1.2399370.

Alarashi, H,. Chambrade, M,. Gondet,S. 2010. Regards Croisés Sur L'étude Archéologique Des Paysages Anciens: Nouvelles Recherches Dans Le Bassin Méditerranéen, En Asie Centrale et Au Proche et Au Moyen-Orient. *Academia.edu* ,Travaux de La Maison de l'Orient et de La Méditerranée 56. Lyon: MOM.

Algebra - Roots of the Cubic Equation." 2015. Accessed July 5. http://www.hawaii.edu/suremath/jrootsCubic.html.

Al-Amaqdissi, M. 1995. "Tell Sh'airat (région de Homs," 196-197).

Ali, C, 2012. Recherches sur les représentations architecturales dans la glyptique du Proche-Orient ancien, Thèse de doctorat, Université de Strasbourg.

Basile, V,. Carrozzo, M T,. Negri, S,. Nuzzo, L,. Quarta, T,. et Villani, A.V. 2000. "A Ground-Penetrating Radar Survey for Archaeological Investigations in an Urban Area (Lecce, Italy)." *Journal of Applied Geophysics* 44 (1): 15–32.

Batayneh, A,. Khataibeh, J,. Alrshdan, H,. Tobasi, U,. et Al-Jahed, N. 2007. "The Use of Microgravity, Magnetometry and Resistivity Surveys for the Characterization and

Preservation of an Archaeological Site at Umm Er-Rasas, Jordan." *Archaeological Prospection* 14 (1): 60–70. doi:10.1002/arp.301.

Baranov, V. 1957. "A New Method for Interpretation of Aeromagnetique Maps: Pseudo_Gravimetric." *GEOPHYSICS,* 22 (2): 359–83. doi: 10.1190/1.1438369.

Baranov, V., et Naudy, H. 1964. "Numerica Calculation of the Formula of Reduction to the Magnetic." *Geophisics* 29 (1): 67–79. doi: 10.1190/1.1439334.

Benech, C. 2000. "Interprétation Conjointe de Cartographies Magnétique et Électromagnétique Des Propriétés Magnétiques Des Sols Anthropisés." Université Pierre et Marie Curie-Paris VI. http://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00411992/.

Benech, C. 2010. "Rapport de Prospection Magnétique Sur Le Site de Tell Sheirat." Maison de l'Orient et de la Méditerranée.

Bertin, C. 1997. En Syrie aux Origines de l'écriture.

Bevan, B.W. 1983. "Electromagnetics for Mapping Earth Features." *Jour- Nal of Field Archaeolog* 10: 47–54. doi: 10.1179/009346983791504354.

Bhattacharyya, B.K. 1965. "Two-Dimentional Harmonic Analysis as a Tool for Magnetic Interpretation." *Geophysics* 30 (5): 829–857. doi: 10.1190/1.1439658.

Bhattacharyya, B.K. 1966. "Continuous Spectrum of the Total Magnetic Field Anomaly due to a Rectangular Prismatic Body." *Geophysics* 31 (1): 97–121. doi: 10.1190/1.1439767.

Blurad, C,. Luffin, X,. Qouider H., et Robert, Y. 1997. "Trois Campagnes de Fouilles À Tell Beydar (1992-1994)." Rapport préliminaire 3. Turnhout.

Bouiflane, M. 2008. Cartographies aéromagnétique et magnétique multi-échelles : étude structurale d'une région du Fossé Rhénan. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg I., 206 pp.

Bonomo, N ,. Osella, A,. Ratto, N . 2010. "Detecting and Mapping Buried Buildings with Ground-Penetrating Radar at an Ancient Village in Northwestern Argentina." *Journal of Archaeological Science* 37 (12): 3247–355. doi:10.1016/j.jas.2010.07.025.

Bottraud, J.C,. Bornand, M,. et Servat, E. 1984. "Mesures de Résistivité Appliquées À La Cartographie En Pédologie." *Science Du Sol* 4: 279–294.

Brossé, C.L. 1929. “Tell Beidar En Haute Djezireh.” Syria.

Blakely, R.C. 1996. *Potentiel Theory in Gravity et Magnetic Application*. Vol. 8. 8.3 vols.

Burnez, C,. et Hesse, A. 1967. “Prospections géophysiques sur les sites archéologiques de la Charente.” *Bulletin de la Société préhistorique française* 64 (2): 299–304. doi:10.3406/bspf.1967.4116.

Buterlin, P. 2008. “Les Nouvelles Recherches Archéologiques À Mari (2005-2006)", Studia Orontica on.”

http://studiaorontica.org/2index.php?option=com_content&task=view&id=23&itemid=35.

Butterlin, P. 2010. “Cinq Campagnes À Mari : Nouvelles Perspectives Sur L’histoire de La Métropole Du Moyen Euphrate.” Comptes rendus de l’Académie des Inscriptions et Belles-Lettres 2010.

Butterlin, P. 2010. “D’Uruk à Mari.: Recherches récentes sur la première révolution urbaine en Mésopotamie.” *Histoire urbaine* 29 (3): 133. doi:10.3917/rhu.029.0133.

Buterlin, P. 2013. “Limites Urbaines et Enceintes Fortifiées Éléments de Topologie Urbaine Au Proche Orient Ancien Au IIIe Milénaire Avant Notre Ère,” 255–63.

Castel, C. 2007. “L’Abandon D’al-Rawda(Syrie) a La Fin Du Troisième Millénaire:premières Tentatives D’explication.” In *Sosiétés Humaines et Changement Climatique À La Fin Du Troisième Millénaire*, 159–78. Lyon.

Castel, C. 2004. “Deuxième Mission Archéologique Syro-Française Dans La Micro-Région d’Al-Rawda” *Akkadica* 1: 4–8.

Castel, C. 2008. “Ocuupation Du Sol et Exploration Des Ressources de La Steppe Syrienne Au Bronze Ancien . AL-Rawda et Sa Micro-Rigion.” In *Villes,villages,campagnes de L’age Du Bronze*, 47–60. France.

Castel, C,. N. Awad, N. 2003. Première mission archéologique syro-française dans la micro-région d'al-Rawda (Syrie intérieure) : la campagne de 2002. *Notes et Nouvelles d'Archéologie Orientale*, 2003, pp.6-10

Castel, C,. et Meyer, J. 2009. “Projet d’ANR Franco-Allmend 2009 BADIYAH,Villes Circulaires Du IIIe Millénaire Av. J.-C. Dans Les Marges Arides de Syrie : Genèse, Développement et Déclin.”

Castel, C,. et Peltenburg, E. 2007. “Urbanism on the Margins: Third Millennium BC Al-Rawda in the Arid Zone of Syria.” *Antiquity* 81(313): 601–616.

Castel, C,. Archambult, D,. Barge, O,. Boudier, T,. Courbon, P,. Cuny, A,. Gondet, S,. Herveux, L,. Isnard, F,. Martin, L,. Monchambert, J.Y,. Moulin, P,. Pousaz, N,. Sanz, S. 2005. “Rapport préliminaire sur les activités de la mission archéologique franco-syrienne dans la micro-région d'Al-Rawda (Shamiyeh) : deuxième et troisième campagnes (2003 et 2004) “. *Akkadica* 126*:* 51-95

Castel, C,. Dorothée, A,. Awad, N,. Barge, O,. Boudier, T., Brochier, J,. Cuny, A,. Gondet, S,. Herveux, L,. Isnard, F,. Martin, L,. Quenet, P,. Sanz, S,. et Vila, E. 2008. “Rapport Préliminaire Sur Les Activités de La Mission Archéologique Franco-Syrienne Dans La Micro-Région d’Al-Rawda (Shamiyeh) : Quatrième et Cinquième Campagnes (2005 et 2006)”. *Akkadica*129: 5–52.

Castel, C,. Awad, N,. Alkontar, R,. et Munshy, M. 2014. “Rapport Préliminaire Sur Les Activités de La Mission Archéologique Franco Syrienne d’Al-Rawda, Travaux 2007-2010 (Part 2).” *Akkadica* 135.

Chamberlain, A,. Sellers, W,. Proctor, C,. et Coard, R. 2000. “Cave Detection in Limestone Using Ground Penetrating Radar.” *Journal of Archaeological Science* 27 (10): 957–964. doi:10.1006/jasc.1999.0525.

Colin, R. 2005. “Aeromagnetic Survey.”.*Geosoft.*

Conyers-Lawrence, B,. et Dean, G. 1997. Ground-Penetrating Radar. *AltaMira Press*. 232 pages. http://www.olemiss.edu/research/anthropology/haley/class2010/07Conyers2.pdf.

Cooper, G.R,. et Duncan, D.R . 2003. “The Application of Fractional Calculus to Potential Field Data.” *Exploration Geophysics* 34 (1/2): 51–56.

Cooper, G.R.J., et Cowan D.R. 2006. “Enhancing potential field data using filters based on the local phase.” *Computers & Geosciences* 32 (10): 1585–1591. doi:10.1016/j.cageo.2006.02.016.

Dahlin, T,. et Zhou, B. 2004. “A Numerical Comparison of 2D Resistivity Imaging with 10 Electrode Arrays.” *Geophysical Prospecting* 52 (5): 379–98.

Davis, J.L,. et Annan, A.P. 1989. “Ground-Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy.” *Geophysical Prospecting* 37: 531–551.

Debeglia, N,. et Dupont, F. 2002. “Some critical factors for engineering and environmental microgravity investigations.” *Journal of Applied Geophysics* 50 (4): 435–454. doi:10.1016/S0926-9851(02)00194-5.

De Nayer, F,. Pozzi, J.P,. et Tabbagh, A. 1979. “Les Propriétés Phisiques Des Sols.” *Les Dossier de L’archéologie*, Méthode de prospection et de datation, no. 39: 22–25.

Dunlop, D.J. 1973 . Superparamagnetic and single-domain threshold sizes in magnetite .*Journal of Geophysical Research*, **78**, 1780-1793. doi: 10.1029/JB078i011p01780.

Di Fiore, B,. et Chianese, D. 2008. “Electric and Magnetic Tomographic Approach for the Geophysical Investigation of an Unexplored Area in the Archaeological Site of Pompeii (Southern Italy).” *Journal of Archaeological Science* 35 (1): 14–25. doi:10.1016/j.jas.2007.02.020.

Dmitry, B,. et Romalis, M. 2008. “Optical Magnetometry.” *Nature Physics* 3 : 227 - 234. doi:10.1038/nphys566.

Drahor, M.G. 2011. “A Review of Integrated Geophysical Investigations from Archaeological and Cultural Sites under Encroaching Urbanisation in İzmir, Turkey.” *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 36 (16): 1294–1309. doi:10.1016/j.pce.2011.03.010.

Du Mensil du Bouisson. 1930. “Compte-Rendu de La Quatrième Campagne de Fouilles À Mishrifé-Qatna.” *Syria XI* 11 (2): 146–63.

El-Fouly, A. 2002. Void investI gation at Gabbari tombs, Alexandria, Egypt using ground penetrating radar technique” Proceedings of the International Conference on the En vironmental Hazards Mitigation, ICEHM2000, Cairo University, Egypt, September, 84-90

Eppelbaum, L.V. 2011. “Study of Magnetic Anomalies over Archaeological Targets in Urban Environments.” *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 36 (16): 1318–1330. doi:10.1016/j.pce.2011.02.005.

Everett, M. 2013. Near-Surface Applied Geophisics. *Cambridge University Press*. isbn: 9781107018778.

Fleury, S. 2011. "Méthode Magnétique Appliquée À L'exploration Multiéchelle Du Bassin de Franceville." Université de Strasbourg. http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00753300/.

"**Forum de Sciences Physiques : Champ Magnétique." 2015.** Accessed July 2. http://www.ilephysique.net/forum-sujet-238376.html.

Francese, R.G, Finzi, E, et Morelli, G. 2009. "3-D High-Resolution Multi-Channel Radar Investigation of a Roman Village in Northern Italy." *Journal of Applied Geophysics* 67 (1): 44–51. doi:10.1016/j.jappgeo.2008.09.004.

Foucault, A,. et Raoult, J.F., 1988 : *Dictionnaire de géologie, 3ème édition*, Ed. Masson.

Fortin, M. 1999. Syrie terre de civilisations : Exposition, Musée de la civilisation, Québec, canada

Freke, A.M,. et Tate, D. 1961 : The formation of magnetic iron sulphide by bacterial reduction in iron solutions, *J. Biochem. Microbiol. Technol. Eng.*, **3**, 29-39.

Godio, A,. et Piro, S. 2005. "Integrated data processing for archaeological magnetic surveys." *The Leading Edge* 24 (11): 1138–44.

Gondet, S,. et Castel, C. 2004. "Prospection Géophysique À Al-Rawda et Urbanisme En Syrie Au Bronze Ancien." *Paléorient* 30(2): 93–109.

Graham, I.D.G,. et Scollar, I. 1976 . Limitations on magnetic prospection in archaeology imposed by soil properties. *Archaeo-Physica*, 6, 1-24.

Geyer, B. 2001. "Conquête de La Steppe et Appropriation Des Terres Sur Les Marges Arides Du Croissant Fertile." Travaux de la Maison de l'Orient 36. Lyon. 220 pages ISBN 978-2 903264-78-9.

Hesse, A. 1965. Prospections Géophysiques À Faible Profondeur : Applications À L'archéologie. Paris. 149 pages. ASIN: B0014VGGMK.

Hesse, A,. Luis Barba, L,. Karl Link, K,. et Ortiz, A. 1997."Magnetic and Electrical Study of Archaeological Structures at Loma Alta, Michoacan, Mexico," *Archaeological Prospection* 4(2): 53–67.

Hinz, W.J,. Frese, R.B, et Saad, A.H. 2013. Gravity and Magnetic Exploration Principles, Practices, and Applications . *Cambridge University Press*. New York.

Herveux, L. 2004. "Étude Archéobotanique Préliminaire de Tell Al-Rawda, Site de La Fin Du Bronze Ancien En Syrie Intérieure." *Akkadica* 125 (1): 79–92.

Hole, F. 2002. "Intermittent Settlement in the Jebel Abd el-Aziz Region." in M. *Al-*Maqdissi, M. *Abdul* Marim, A. Al-Azm and M.D AL khoury,. *the Syrian Jezira. Cultural Heritage and Interrelation. Proceeding of the International Conference held in Deir ez-Zor. April 22nd-25th 1996* Damascus,p.139-152.

"**Inside the Earth [This Dynamic Earth, USGS]." 2015**. Accessed July 2. http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/inside.html.

International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Working Group V-MOD. Participating members , Finlay, C,. Maus, S,. Beggan, C.D,. Bondar, T.N,. Chambodut, A,. Chernova, T. 2010. "International Geomagnetic Reference Field: The Eleventh Generation: IGRF-11." *Geophysical Journal International* 183 (3): 1216–30. doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04804.x.

Jaubert, R,. et Ggyer, B. 2006. "Conquête de La Steppe 2. Les Marges Arides Du Croissant Fertile. Peuplement, Exploitation et Contrôle Des Ressources En Syrie Du Nord." Travaux de la Maison de l'Orient 43. Lyon,205p.

Jiménez-Martínez, R,. Griffith, C,. Knappe, S,. Kitching, J,. et Prouty, M. 2012. "High-Bandwidth Optical Magnetometer." *JOSA B* 29 (12): 3398–3403. doi: 10.1364/JOSAB.29.003398

Jones, O. 2000. A guide to dating glass tableware: 1800-1940.in: Karlis Karklins(ed.), studies in Material Culture Research,pp.141-232."Society for Historical Archaeology.",PennsyI Vania.

Joannès, F. 2001. Dictionnaire de la civilisation mésopotamienne ; assisté de **Michel,C,. avec la collaboration de Bachelot,L,. Battini,L,., Bonechi,M,. castel, C,. Charpin,D,., Faivre,X,., Lafont,B,. , Lafont,S,. Lion,B,. Lyonnet,B,. Ritter, J,. Sauvage, M,. Vallat,F,. Villard,P,. Ziegler,N,.Laffont,R.** Paris.

Kono, M. 1971. “ntensity of the earth's magnetic field during the Pliocene and Pleistocene in relation to the amplitude of mid-ocean ridge magnetic anomalies .” *Earth and Planetary Science Letters* 11 (1): 10–17. doi:10.1016/0012-821X(71)90134-8

Kouchoukos, N. 1999. “Landscape and Social Change in Late Prehistoric Mesopotamia.” Yale: Yale University.

Kvamme, K. L. 2003. “Geophysical Surveys as Landscape Archaeology.” *American Antiquity* 68 (3): 435-457. doi:10.2307/3557103.

Lambot, S,. Slob E.C,. van den Bosch, I,. Stockbroeckx, B,. et Vanclooster, M. 2004. “Modeling of Ground-Penetrating Radar for Accurate Characterization of Subsurface Electric Properties.” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42 (11): 2555–68. doi:10.1109/TGRS.2004.834800.

Lebeau, M,. et Suleiman, A. 2007.(a cura di), “*Tell Beydar. The 2000-2002 Seasons of excavation, the 2003-2004 season of architectural restoration.A preliminary report*, (*Subartu* 15), Turnhout.

Leopold, M,. Plöckl, T,. Forstenaicher, G,. et Völkel, J. 2010. “Integrating Pedological and Geophysical Methods to Enhance the Informative Value of an Archaeological Prospection – The Example of a Roman Villa Rustica near Regensburg, Germany.” *Journal of Archaeological Science* 37 (7): 1731–1741. doi:10.1016/j.jas.2010.01.033.

Linford, N. 2006. “The Application of Geophysical Methods to Archaeological Prospection.” *Reports on Progress in Physics* 69 (7): 2205–57. doi:10.1088/0034-4885/69/7/R04.

Liu,O,. Roberts, A.P,. Larrasoaña, J.C,. Banerjee, S.K,. Guyodo,Y,. Tauxe, L,. Oldfield, F. 2012. “Environmental Magnetism: Principles and Applications.” *Reviews of Geophysics* 50 (4). doi:10.1029/2012RG000393.

Margueron , J.C. 2003. Les mésopotamiens. *Picard,* Paris.

Margueron, J.C. 2004. “Mari: Métropole de l’Euphrate, Au IIIe et Au Début Du IIe Millénaire Av. J.-C.” Picard, ERC, Paris, 575 p.

Mann, S,. Sparks, N.H.C,. Frankel, R.B,. Bazylinski, D.A,. et Jannash, H.W. 1990: Biomineralization of ferrimagnetic greigite (Fe3S4) and iron pyrite (FeS2) in a magnetotactic bacterium, *Nature*, 343, 258-261. doi:10.1038/343258a0.

MALA-GPR-Principle.jpg (Image JPEG, 1536 × 1280 Pixels) - Redimensionnée (55%).” 2015. Accessed July 1. http://www.malags.com/getattachment/Innovation/GPR-Explained/MALA-GPR-principle.jpg.

Marmet, E., et Tabbagh, A., 2001. Les propriété magnétiques des sols : origine, caractéristiques et perspectives pour l'étude de l'évolution des paysages, in *3ème Colloque GEOFCAN* , edited by INRA, pp. 21-24, Orléans, France.

Maus, S,. Macmillan, S,. Chernova, T,. Choi, S,. Dater, D,. Golovkov, V,. et Lesur, V . 2005. “The 10th Generation International Geomagnetic Reference Field.” *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 151 (3-4): 320–22. doi:10.1016/j.pepi.2005.03.006.

Mioara, M,. Macmillan, S,. Bondar, T,. Golovkov, V,. Langlais, B,. et Lowes, F. 2000. “International Geomagnetic Reference Field — 2000 International Association of Geomagnetism and Aeronomy_IAGA., Division V, Working Group 8” 120: 39–42.

Munschy, M,. et Fleury, S. 2011. “Scalar, Vector, Tensor Magnetic Anomalies: Measurement or Computation: Scalar, Vector, Tensor Magnetic Anomalies.” *Geophysical Prospecting* 59 (6): 1035–1045. doi:10.1111/j.1365-2478.2011.01007.x.

Munschy, M,. Boulanger, D,. Ulrich, P,. et 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): 168–183. doi:10.1016/j.jappgeo.2006.06.004.

Nabighian, M.N,. Grauch, V.J.S,. Hansen, R.O,. Lafehr, T.R,. Li, Y,. Peirce, J.W,. Phillips, J.D,. et Ruder, M.E. 2005. “The Historical Development of the Magnetic Method in Exploration.” *GEOPHYSICS* 70 (6): 33ND – 61ND. doi:10.1190/1.2133784.

Nabighian, M.N. 1972. “The Analytic Signal of Tou- Dimensional Magnetic Bodies with Polygnonal Cross-Esction : Its Properties and Use for Automated Anomaly Interpretation.” *Geophysics* 37 (3): 507–17. doi: 10.1190/1.1440276.

Noel, M,. et Xu, B . 1991. “Archaeological Investigation by Electrical Resistivity Tomography: A Preliminary Study.” *Geophysical Journal International* 107 (1): 95–102. doi: 10.1111/j.1365-246X.1991.tb01159

Primdahl, F. 1979. “The Fluxgate Magnetometer.” *Journal of Physics E: Scientific Instruments* 12 (4): 241.

Peter. 2015. “l’Age d’Or: Ages Préhistoriques.” Accessed June 18. http://age-d-or.blogspot.fr/2011/06/ages-prehistoriques.html.

Quesnel, Y,. Jrad, A,. Mocci, F,. Gattacceca, J,. Mathé, P.E,. Parisot, J.C,. Hermitte, D,. Dumas, V,. Dussouillez, P,. Walsh, K,. Miramont, C,. Bonne, S,. et Uehara, M. 2011. “Geophysical Signatures of a Roman and Early Medieval Necropolis: Geophysical Signatures of a Necropolis.” *Archaeological Prospection* 18 (2): 105–15. doi:10.1002/arp.411.

Quenet, P. 2013. “Khirbet Malhat (Syrie Du Nord) et Les Villes Circulaires Du IIIe Millénaire Avant J.-C. En Jezireh.” Strasbourg: Strasbourg.

Ripka, P. 2003. “Advances in Fluxgate Sensors.” *Sensors and Actuators A: Physical* 106 (1-3): 8–14. doi:10.1016/S0924-4247(03)00094-3.

Ripka, P. 2000. “New Directions in Fuxgate Sensors.” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 215–216 : 735–739. doi:10.1016/S0304-8853(00)00273-0.

Rosendahl, D,. Lowe, K. M,. Wallis, L. A,. et Ulm, S. 2014. “Integrating Geoarchaeology and Magnetic Susceptibility at Three Shell Mounds: A Pilot Study from Mornington Island, Gulf of Carpentaria, Australia.” *Journal of Archaeological* 49, :21–32. doi:10.1016/j.jas.2014.04.017

Roest, W.R,. Arkani-Hamed, J,. et Verhoef, J. 1992. “The Seafloor Spreading Rate Dependence of the Anomalous Skewness of Marine Magnetic Anomalies.” *Geophysical Journal International* 109 (3): 653–69. doi: 10.1111/j.1365-246X.1992.tb00123

Sallaberger, W,. et UR, J. A. 2004. “Tell Beydar/Nabada in Its Regional Setting.” Third Millennium Cuneiform Texts from Tell Beydar (Seasons 1996-2002) Subartu 12.

Salem, A,. Campbell, S,. Moorhead, L,. et Fairhead, D. **2013.** “An Enhanced Tilt Depth Method for Interpreting Magnetic Data over Vertical Contacts of Fini.” *EAGE Conference Exhibition Incorporationg Sep EUROPEC 2013* 75. doi: 10.3997/2214-4609.20130595

Salem, A,. Ravat , D,. Gamey, T.J,. et Ushijima , K. 2002. "Analytic Signal Approach and Its Applicability in Environmental Magnetic Investigations." *Journal of Applied Geophysics* 49 (4): 231–44. doi:10.1016/S0926-9851(02)00125-8.

Salem, A,. Williams, S,. Fairhead, D,. Smith, R,. et Ravat, D. 2008. "Interpretation of Magnetic Data Using Tilt-Angle Derivatives." *GEOPHYSICS* 73 (1): L1–10. doi:10.1190/1.2799992.

Salem, A,. Williams, S,. Fairhead, D,. Ravat, D., et Smith, R. 2007. "Tilt-Depth Method: A Simple Depth Estimation Method Using First-Order Magnetic Derivatives." *The Leading Edge* 26 (12): 1502–5. doi: 10.1190/1.2821934.

Salem ,A,. Fairhead, D,. et Aboud E. 2010. "Extended Tilt Depth–A Fast Depth Imaging Method Using Local Wavenumbers of Magnetic Data." In *72nd EAGE Conference & Exhibition*. http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=39240. doi: 10.3997/2214-4609.201400748

Sala, R,. Garcia, E,. et Tamba, R. 2012. "Archaeological Geophysics–From Basics to New Perspectives." *Http://www. Intechopen. Com/books/archaeology-New-Approaches-in-Theory-and-Techniques/archaeological-Geophysics-from-Basics-to-New-Perspectives (accessed 1 April 2013)*. http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/36570.pdf. doi: 10.5772/45619.

Scollar, I,. Weinder, B,. et Segeth, K. 1986. "Display of Archaeological Magnetic Data." *Geophysics* 51 (3): 623–33. doi: 10.1190/1.1442116.

Shaaban, F,. et Fathy, A. 2001. "Use of Two-Dimensional Electric Resistivity and Ground Penetrating Radar for Archaeological Prospecting at the Ancient Capital of Egypt." *Journal of African Earth Sciences* 33 (3-4): 661–71. doi:10.1016/S0899-5362(01)00091-4.

Shuey, R.T. 1972. "Application of Hilbert Transforms to Magnetic Profiles." *Geophysics* 37 (6): 1043–1045. doi: 10.1190/1.1440313.

Simon, F.X. 2012. "L'apport de L'outil Géophysique Pour La Reconnaissance et La Caractérisation Des Sites En Archéologie Préventive, Méthodes et Perspectives: Exemples En Alsace." Université Pierre et Marie Curie-Paris VI. http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00749112/.

Silliman, S.W,. Farnsworth, P,. et Lightfoot, K. 2000. “Magnetometer Prospecting in Historical Archaeology: Evaluating Survey Options at 19th-Ccentury Rancho Site In California.”*Historical Archaeology* 34 (2) : 89-109. Stable URL: http://www.jstor.org/stable/25616790.

Tabbagh, A., Dabas, M., Hesse, A., et Panissod , C. (2000). Soil resistivity: a non -invasive tool to map soil structure horizonation. *Geoderma*, 97(3), 393-40.

Talwani, M,. Worzel, L,. et Landisman, M. 1959. “Rapid Gravity Computations for Two-Dimensional Bodies with Application to the Mendocino Submarine Fracture Zone.” *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 64 (1): 49–59. doi: 10.1029/JZ064i001p00049.

Talwani, M,. et Heirtzler, J.R. 1964. “Computation of Magnetic Anomalies Caused by Two Dimensional Structures of Arbitrary Shape.” *Computers in the Mineral Industries, Part I: Stanford Univ. Publ., Geological Sciences* 9 (621): 464–80.

Van Liere, W.J,. et Lauffray, J. 1954. “Nouvelles Prospections Dans La Haute Jezireh Syrienne.” *Annales Archéologiques Arabes Syriennes* 4 (5): 129–148.

Vila, E,. et Besso, M. 2006. “Résultats Préliminaires de L’étude de La Faune D’al-Rawda (campagnes 2002 À 2004).” Akkadica 126(2) : 111-119.

Verduzco, B,. Fairhead, D,. Green, C.M,. et MacKenzie, C. 2004. “New Insights into Magnetic Derivatives for Structural Mapping.” *The Leading Edge* 23 (2): 116–119. doi: 10.1190/1.1651454.

Westohal, M. 1986 . Paléomagnétisme et magnétisme des roches. Paris: Doin-Editeurs.

Wendt, A.S,. Vaughan ,A.P,. Ferraccioli, F,. et Grunow, N.M. 2013. “Magnetic Susceptibilities of Rocks of the Antarctic Peninsula: Implications for the Redox State of the Batholith and the Extent of Metamorphic Zones.” *Tectonophysics* 585 (February): 48–67. doi:10.1016/j.tecto.2012.07.011.

Wilkinson, T. 2000. “Archaeological Survey of the Beydar Region Syria 1997.” Preliminary Report . in Tell Beydar: Environemental and Technical Studies . Subartu 6, ed. K. Van Leberghe and G.Veot, pp. 1-37 Turnhout: Berpols.

Wilkinson, T. 2002. “Recent Archeological Surveys in Syria", Annales Archéologiques Arabes Syriennes.” *Les annales archéologiques arabes syriennes. Revue d'archéologie et d'histoire* 45-46 (2002-2003).

Wolfgang, N. 2001. “Images of the Invisible-Prospection Methods for the Documentation of Threatened Archaeological Sites.” *Naturwissenschaften* 88 (1): 13–24. doi:10.1007/s001140000192.

Weymouth, J,. et Huggins, R. 1986. “Geophysical Surveying of Archaeological Sites” *Springer*

8 (1): 192–235.

Zhou, B,. et Dahlin, T. 2003. “Properties and Effects of Measurement Errors on 2D Resistivity Imaging Surveying.” *Near Surface Geophysics* 1 (3): 105–117. doi: 10.3997/1873-0604.2003001.

Rozan ALKHATIB ALKONTAR

Magnétisme des villes circulaires du troisième millénaire avant J.C dans les marges arides de la Syrie

Résumé

À l'heure actuelle, la prospection magnétique est reconnue comme une méthode efficace pour répondre à des problématiques archéologiques en partie du fait de sa capacité à détecter les structures enfouies (bâtiments, fosses, canaux, etc,…). Elle permet de mettre en évidence et de localiser avec précision les structures et elle est donc une aide précieuse avant le début des opérations de fouilles. Notre travail rend compte de cartographies magnétiques effectuées sur trois sites archéologiques en Syrie (Al-Rawda, Sh'airat, Malhat Ed-Deru) en utilisant deux méthodes de cartographie magnétique à différents niveaux de résolution. La première méthode (à la perche) permet de couvrir de grandes surfaces rapidement et la deuxième méthode (à la luge), plus lente, permet de mieux imager les structures enfouies. Ces méthodes fournissent des plans urbanistiques des villes circulaires du troisième millénaire avant J.C. Les opérateurs de méthodes potentielles et la modélisation ont permis de caractériser la géométrie des structures aimantées.

Mots-clés

Cartographie magnétique; villes circulaires; Al-Rawda ; Sh'airat; Malhat Ed-Deru ; méthodes potentielles

Abstract

Currently, magnetic surveying is recognized as an effective method to address archaeological issues in part because of its ability to detect buried structures (buildings, pits, channels, etc ...). It allows identifying and accurately locating structures and is therefore a valuable aid before the commencement of excavation. Our work reports on magnetic mapping done at three archaeological sites in Syria (Al-Rawda, Sh'airat, Malhat Ed-Deru) using two methods of magnetic mapping at different levels of resolution, The first method (Backpack) allows to cover large areas quickly and the second method (Sledge), slower, allows better imaging of buried structures. These methods have provided urban planning circular cities of the third millennium BC. The modeling method swapped to characterize the magnetic sources.

Keywords

Magnetic survey; circular city; Al-Rawda ; Sh'airat; Malhat Ed-Deru ; potential methods