



**HAL**  
open science

# Interprétation conjointe de cartographies magnétique et électromagnétique des propriétés magnétiques des sols anthropisés

Christophe Benech

► **To cite this version:**

Christophe Benech. Interprétation conjointe de cartographies magnétique et électromagnétique des propriétés magnétiques des sols anthropisés. Géophysique [physics.geo-ph]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2000. Français. NNT : . tel-00411992

**HAL Id: tel-00411992**

**<https://theses.hal.science/tel-00411992>**

Submitted on 31 Aug 2009

**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.

THESE de DOCTORAT de l'UNIVERSITE PARIS 6

Spécialité :  
Géophysique appliquée

présentée par  
M. Christophe BENECH

pour obtenir le grade de DOCTEUR de l'UNIVERSITE de PARIS 6

Sujet de la thèse :

**Interprétation conjointe de cartographies magnétique et  
électromagnétique des propriétés magnétiques des sols anthropisés**

soutenue le 14 janvier 2000

devant le jury composé de :

M. Olivier Buchsenschutz	Examineur
M. Jörg Faßbinder	Rapporteur
M. Armand Galdéano	Rapporteur
M. Pierre Mechler	Examineur
M. Pierre Rochette	Examineur
M. Alain Tabbagh	Directeur de thèse
M. Albert Hesse	Invité

---

*« En dehors des taches et autres phénomènes visibles révélateurs d'accidents souterrains, il existe à la surface du sol des particularités qui échappent à nos sens et sont dues aussi à l'état du sous-sol. Des instruments de précision permettent de découvrir ces particularités formant aussi des espèces de taches de gravité, de magnétisme, de conductibilité plus intenses. »*

Comte Robert du Mesnil du Buisson, 1934

*« La technique des fouilles archéologiques »*

## Remerciements

---

Je tiens tout d'abord à remercier tous les membres du jury qui ont accepté de consacrer une partie de leur temps de recherche à lire cet ouvrage, en particulier MM. Jörg Faßbinder et Armand Galdeano pour leurs corrections et leurs remarques pertinentes.

Je suis reconnaissant à Alain Tabbagh d'avoir accepté de diriger cette thèse et de l'attention qu'il a portée sur ce travail durant ces trois années. J'ai apprécié ses compétences, sa rigueur de travail et la qualité des rapports que nous avons entretenus, essentiels pour la bonne marche d'une thèse.

Albert Hesse a plus d'une fois accepté de me prendre dans ses "valises", entre sa boîte d'aquarelles et son carnet de dessin. Je lui dois en particulier deux grands voyages et deux grands projets de prospection archéologique : Alexandrie et Pasargades. Son expérience du terrain et ses qualités d'observation ont constitué un complément essentiel à ma formation.

Justine Gaborit, responsable des fouilles du site d'Apamée et Gérard Thébault, topographe, ont été les deux compagnons de la grande aventure qu'a été pour moi l'étude d'Apamée. Le succès des prospections magnétiques doit beaucoup à leur compétence et aux échanges que nous avons entretenus, méditant tous trois sur les cartes de prospection.

Je n'oublie pas cependant toute l'équipe de géophysiciens qui a travaillé avec moi sur ce projet : Cécile Laroche, qui a travaillé les deux premières années sur Apamée, est aujourd'hui partie vers d'autres cirques... Nicolas Florsch, Christian Camerlynck et Delphine Vergnaud se sont eux aussi beaucoup investis dans ce travail et nous ont permis d'obtenir des cartes de grande qualité, malgré tous les problèmes que posait l'environnement d'Apamée pour les prospections.

Je ne remercie pas Cécile Laroche d'avoir quitté le bureau en face de moi et de m'avoir privé de sa joyeuse compagnie. Je remercie Eric Marmet d'être venu s'asseoir à ce bureau : son expérience de géologue et d'analyste m'ont beaucoup aidé ; sa bonne humeur et son rire contagieux m'ont procuré d'inoubliables digestions.

L'élaboration du CS150 a été longue et a demandé beaucoup d'énergie, notamment de la part des électroniciens qui se sont succédés à l'établi : Sylvain Viateur, Landry Maricot et Sébastien Flageul ont tour à tour monté et démonté ce capricieux appareil et ont été, par tous les temps, d'agréables compagnons de terrain lors des innombrables essais qu'a entraîné chaque amélioration.

Jeanne Tabbagh a toujours été présente pour résoudre, avec beaucoup de gentillesse, les multiples problèmes informatiques que j'ai pu rencontrer ; son "bébé" Wumap m'a particulièrement aidé pour le traitement d'une grande partie des cartes présentées dans ce mémoire.

Il y a plusieurs années de cela, j'avais réalisé ma première prospection magnétique avec Michel Dabas ; cette expérience a beaucoup joué dans mon choix de continuer mes études en géophysique. Cette fin de thèse me donne l'occasion de le remercier d'avoir su me transmettre sa passion pour son travail. Je le remercie aussi pour le coup de pouce qu'il a donné au projet Apamée, *via* Terra novA, et de m'avoir fait profiter de son expérience à cette occasion.

Mes différentes campagnes de prospection m'ont amené à rencontrer plusieurs archéologues qui ont désiré intégrer la prospection géophysique dans leur démarche de recherche et ont ainsi contribué à la réalisation de nombreux projets : Philippe Barral, Rémy Boucharlat, Jean-Yves Empereur, Pierre Leriche et Marie-Dominique Nenna.

Je remercie M. Pierre Mechler, directeur du Département de Géophysique Appliquée, de m'avoir accueilli dans son laboratoire ainsi que tous les membres de son équipe dont la compagnie a toujours été des plus agréables.

Je remercie aussi tous les membres du Centre de Recherches Géophysiques de Garchy pour leur accueil lors de mes séjours dans le plat pays nivernais pour les essais de terrain.

---

# Table des matières

---

<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>i-v</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE PRELIMINAIRE :PROSPECTION MAGNETIQUE SUR LA VILLE D'APAMEE DE L'EUPHRATE.....</b>	<b>3</b>
<b>I. Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>II. Historique des recherches.....</b>	<b>3</b>
<b>III. Méthodes de recherche.....</b>	<b>6</b>
<b>IV. Exploitation des données géophysiques pour l'archéologie .....</b>	<b>9</b>
IV.1. Découverte des fortifications .....	9
IV.2. Etude de l'urbanisme hellénistique.....	13
<b>Perspectives d'exploitation des données géophysiques .....</b>	<b>17</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>18</b>
<b>CHAPITRE 1 : PROPRIETES MAGNETIQUES DES SOLS .....</b>	<b>19</b>
<b>I. Introduction.....</b>	<b>19</b>
<b>II. Principes généraux sur le comportement magnétique des sols.....</b>	<b>19</b>
<b>III. Identification des minéraux magnétiques.....</b>	<b>20</b>
III.1. La magnétite .....	20
III.2. La maghémite .....	21
III.3. Autres minéraux.....	22
III.3.1. La greigite .....	22

III.3.2. L'hématite.....	23
<b>IV. Phénomènes naturels liés à la formation de minéraux magnétiques dans le sol.....</b>	<b>24</b>
IV.1. Influence de la géologie.....	24
IV.2. Influence du climat .....	25
IV.3. Erosion des sols .....	25
<b>V. Cas des sols anthropisés .....</b>	<b>26</b>
<b>VI. Paramètres magnétiques mesurables <i>in situ</i> en prospection .....</b>	<b>27</b>
VI.1. Susceptibilité magnétique.....	27
VI.2. Aimantation rémanente.....	28
VI.3. La viscosité magnétique .....	28
<b>VII. Conclusion.....</b>	<b>29</b>
<b>CHAPITRE 2.....</b>	<b>31</b>
<b>MESURES DES PROPRIETES MAGNETIQUES DES SOLS EN PROPECTION GEOPHYSIQUE .....</b>	<b>31</b>
<b>I. Méthode électromagnétique.....</b>	<b>31</b>
I.1. Introduction .....	31
I.2. Principes généraux.....	31
I.3. Sources de champ primaire utilisées en prospection de subsurface.....	33
I.4. Les appareils Slingram .....	33
I.5. Systèmes à boucles .....	35
I.6. Historique du développement des appareils et perspectives.....	35
I.6.1. Magnétisme.....	35
I.6.2. Electromagnétisme.....	37
I.6.2.1. <i>Appareils Slingram</i> .....	37
I.6.2.2. <i>Systèmes à boucles</i> .....	40

<b>II. Contraintes et limites des appareils utilisés .....</b>	<b>41</b>
II.1. Magnétomètres .....	41
II.2. Appareils électromagnétiques .....	42
II.2.1. Réponse en phase, influence de la conductivité.....	42
II.2.1.1. Cas des appareils Slingram .....	42
II.2.1.2. Cas des systèmes à boucles .....	45
II.2.2. Profondeur d'investigation .....	49
II.2.2.1. Appareils Slingram .....	49
II.2.2.2. Systèmes à boucles .....	53
II.2.3. Problèmes de dérive et réglage du zéro .....	55
 <b>CHAPITRE 3.....</b>	<b>56</b>
<b>COMPARAISON DE PROSPECTIONS MAGNETIQUE ET ELECTROMAGNETI- QUE PAR FILTRAGE LINEAIRE DES DONNEES : PRINCIPE ET ANALYSE DES MODELES SYNTHETIQUES .....</b>	<b>56</b>
 <b>I. Introduction.....</b>	<b>56</b>
 <b>II. Calcul de la réponse magnétique due à l'aimantation induite à partir de données électromagnétiques par filtrage linéaire .....</b>	<b>57</b>
II.1. Principe théorique .....	57
II.2. Test sur des données synthétiques.....	58
II.2.1. Introduction .....	58
II.2.2. Etude d'une structure en "L" .....	59
II.2.3. Cas d'une structure en forme de plaque .....	65
II.2.4. Cas d'une structure en forme de cube de grande extension en profondeur .....	72
 <b>III. Conclusion .....</b>	<b>77</b>

---

<b>CHAPITRE 4 : ESSAIS EXPERIMENTAUX.....</b>	<b>78</b>
<b>I. Introduction.....</b>	<b>78</b>
<b>II. Structure en "L" .....</b>	<b>78</b>
II.1. Mesure de la susceptibilité magnétique avec un appareil à boucles : le MS2 Bartington.....	82
II.2. Mesure de la susceptibilité magnétique avec les appareils Slingram .....	84
II.3. Mesures de susceptibilité magnétique en laboratoire .....	86
<b>III. Structure en "L" au lieu dit "Les Grands Pâtureaux" .....</b>	<b>88</b>
III.1. Comparaison des cartes électromagnétiques.....	91
III.2. Comparaison des cartes de prospections magnétique et électromagnétiques .....	93
III.2.1. Filtrage des données SH3.....	95
III.2.2. Filtrage des données EM38.....	95
III.2.3. Conclusion .....	95
<b>IV. L'atelier de potier de Dampierre sous Bouhy .....</b>	<b>101</b>
IV.1. Introduction .....	101
IV.2. Prospections électromagnétiques "large maille" .....	102
IV.3. Prospections magnétique et électromagnétique à maille fine .....	106
IV.4. Filtrage des données électromagnétiques .....	109
IV.5. Conclusion.....	113
<b>V. Le site de Verdun sur le Doubs (71) : un habitat de l'âge du fer .....</b>	<b>113</b>
V.1. Introduction.....	113
V.2. Prospection magnétique .....	116
V.3. Prospections électromagnétiques .....	121
V.3.1. Prospection SH3.....	121

---

V.3.2. Prospection CS150 .....	122
V.4. Conclusion .....	130
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>131</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>I-V</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>F1-F6</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>T1</b>
<b>ANNEXE .....</b>	<b>A1-A4</b>

---

## Introduction

---

Les méthodes magnétiques et électromagnétiques sont utilisées en prospection géophysique depuis de nombreuses années ; elles ont pleinement montré leur intérêt pour la connaissance et la gestion du proche sous-sol dans des domaines comme la pédologie, le génie civil ou l'archéologie. Les propriétés magnétiques des sols constituent en effet un paramètre important dans l'étude des processus pédologiques ou anthropiques affectant le sous-sol. Ces méthodes permettent de réaliser une cartographie de ces propriétés sur de grandes surfaces, cartographies qui peuvent être complétées par des études sur échantillons.

Ce mémoire présente d'abord la prospection magnétique du site hellénistique d'Apamée (Turquie). Cet exemple montre l'importance que la prospection géophysique en général, et magnétique en particulier, peut revêtir dans la démarche archéologique et la valeur des données qu'elle permet d'acquérir ; dans l'exemple d'Apamée, c'est la prospection qui fournit le plan qui restera la seule information d'ensemble sur la ville. Il est donc particulièrement intéressant de continuer à développer les méthodes de prospection, dans ce domaine comme dans les autres, et le travail présenté ci-après a pour but d'établir les bases d'une mesure et d'une interprétation simultanée de prospections magnétique et électromagnétique.

Quelle que soit la méthode géophysique utilisée, la réalisation d'une prospection est soumise d'une part aux contraintes propres à la méthode elle-même, d'autre part à celles propres à l'appareil utilisé. Sur ces deux aspects, les méthodes magnétique et électromagnétique présentent une complémentarité intéressante, mais c'est au niveau même de l'information acquise par chacune d'elles que leur utilisation en parallèle se justifie : la méthode électromagnétique permet de mesurer la susceptibilité magnétique apparente d'un terrain alors que la méthode magnétique mesure les variations du champ magnétique terrestres dues à tout type d'aimantations, sans que l'on puisse les différencier. Le calcul par filtrage linéaire dans le domaine spectral de l'anomalie magnétique à partir des données électromagnétiques offre la possibilité, par une comparaison directe des deux types de cartes, de caractériser les différents types d'aimantation à l'origine des anomalies magnétiques et/ou de mieux définir la profondeur des sources d'anomalies.

Après avoir rappelé les difficultés que pose la mesure de la susceptibilité magnétique en électromagnétisme et avoir proposé les solutions les mieux adaptées, le principe du filtrage linéaire est présenté, on montre ensuite son application sur des cas synthétiques, sur des structures artificielles et enfin sur des structures archéologiques.

---

# Chapitre préliminaire : Prospection magnétique sur la ville d'Apamée de l'Euphrate

---

## I. Introduction

Le site d'Apamée se trouve sur la rive orientale de l'Euphrate, à 5 km en amont de Birecik, dans la région de Sanli-Urfa (Turquie) (Fig. 0.1a, b et c). La construction d'un grand barrage hydroélectrique dans ce secteur de la vallée fera disparaître à la fin de l'année 1999 l'intégralité du site. Or les villes d'Apamée de l'Euphrate et de Séleucie – Zeugma située en vis à vis sur la rive occidentale et dont un tiers sera également immergé sous les eaux, constituaient dans l'Antiquité deux centres importants pour l'histoire du Proche-Orient et jusqu'en 1991 jamais encore fouillés.

Une mission préliminaire à la création d'une mission de sauvetage a eu lieu en 1995 (Abadie-Reynal et al., 1996) et les fouilles d'urgence ont débuté en 1996. La mission disposait donc de quatre campagnes annuelles pour l'étude des deux sites. Un délai aussi bref nécessitait donc des moyens rapides permettant une reconnaissance sur l'ensemble du site et fournissant les informations essentielles pour établir une stratégie de fouille efficace.

## II. Historique des recherches

D'après les sources antiques, les villes d'Apamée et de Séleucie-Zeugma ont été fondées au III<sup>ème</sup> siècle av. J.C. par Séleucos I<sup>er</sup>. Les deux villes contrôlaient, dans l'Antiquité, le point de traversée le plus important de l'Euphrate, par lequel passait la voie reliant le monde méditerranéen à la Mésopotamie et à l'Asie centrale aux confins de l'empire séleucide. A la fin du II<sup>ème</sup> siècle av. J.C., les Parthes étendent leur domination sur la Mésopotamie jusqu'à la rive orientale de l'Euphrate et la ville d'Apamée, qui semble avoir subi les effets néfastes des guerres entre Parthes et Romains, n'est plus mentionnée dans les textes antiques. Contrairement à Séleucie-Zeugma dont la prospérité durera jusqu'à l'époque byzantine, Apamée a, on le sait maintenant, périclité et connu seulement une réoccupation durant l'époque romaine et proto-byzantine le long de la rive du fleuve. Le site d'Apamée n'a, dans l'ensemble, été marqué que par un niveau d'occupation relativement homogène qui présente toutes les caractéristiques d'une fondation hellénistique.



*Fig. 0.1a : Localisation du site d'Apamée, sur la rive gauche de l'Euphrate, à mi-chemin entre Gaziantep et Sanli-Urfa.*



*Fig. 0.1b : Localisation de la ville d'Apamée (détail) d'après W.R. Shepherd (1923) avec au nord-est, la ville d'Edes, l'antique Sanli-Urfa, et au sud-ouest, la ville d'Antioche.*



*Fig. 0.1c : Vue générale du site d'Apamée, prise de la rive droite où s'étend le site de Séleucie-Zeugma. Le village de Tilmusa, à gauche sur la photo, recouvre une partie de la ville antique ; le reste de la surface est occupée par des vergers et des champs cultivés.*

Au début du siècle, F. Cumont localise la ville de Séleucie-Zeugma et en déduit, d'après les textes, que la ville d'Apamée se trouve juste en face, sur la rive opposée (Cumont, 1917) ; mais jusqu'en 1976, personne n'a eu l'occasion de traverser l'Euphrate ni de vérifier l'hypothèse de Cumont.

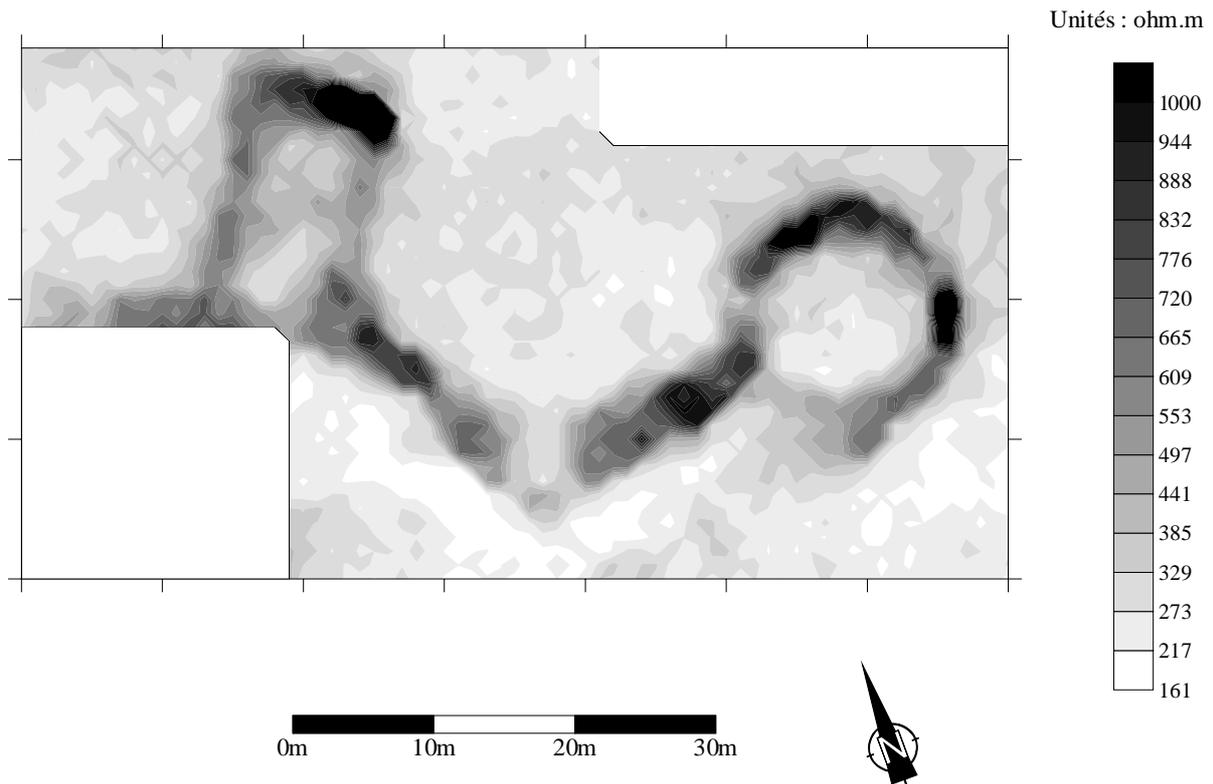
En fait, étant donné le faible nombre des vestiges visibles sur le site et signalés par les successeurs de Cumont (Wagner, 1976 ; Algaze et al., 1991 ; Kennedy, 1994), d'importants doutes demeurent sur l'importance du site et la présence d'un véritable centre urbain à cet endroit. La mission préliminaire de 1995 ne recueille guère d'indices plus déterminants concernant Apamée. Sur le plan archéologique, les éléments de fortification, repérés par Wagner et d'Algaze ont été arasés et les vestiges de murs observés en trois endroits dans les parois des puits qui assurent l'irrigation moderne de la plaine d'Apamée ne permettent pas de définir les limites du site et d'évaluer son importance. Sur le plan géophysique, les profils électriques qui ont mis en évidence une structure résistante ne suffisent pas pour déterminer s'il s'agissait d'un rempart ou d'une digue artificielle.

En 1996 débutent les fouilles d'urgence avec la mission franco-turque « Zeugma-moyenne vallée de l'Euphrate » en collaboration avec les musées de Gaziantep et de Sanli-Urfa. Devant le peu d'éléments dont disposaient les archéologues, un important programme de prospection archéologique a été mis en place, réunissant la prospection pédestre, l'étude topographique et la prospection géophysique.

### **III. Méthodes de recherche**

L'utilisation conjointe des différentes méthodes de prospection a permis, dès la première campagne, de confirmer la présence d'une fondation hellénistique, d'en fixer les limites et de caractériser plusieurs éléments des fortifications de la ville, visibles en surface ou repérés par prospection électrique (Fig. 0.2a et b).

La prospection électrique restait cependant difficile à mettre en œuvre et d'un rendement relativement faible (0,25 ha/jour). La mission de 1997 prévoyait d'achever l'étude des fortifications et d'explorer l'intérieur de la ville. Le site couvrant plus de 30 ha, il était nécessaire de choisir une méthode géophysique adaptée au contexte géologique et archéologique et permettant de couvrir rapidement de grandes surfaces.



*Fig. 0.2a : Prospection électrique de la tour circulaire et de la tour 12 sur le rempart nord*



*Fig.0.2b : Fouille de la tour circulaire : le diamètre intérieur de la tour est de 11 m et l'épaisseur du rempart est de 3 m. La tour est composée de blocs calcaires en appareil polygonal, avec deux assises en fondation et deux assises en élévation ; le reste de la tour était construit en brique crue, dont il ne reste plus aucune trace.*

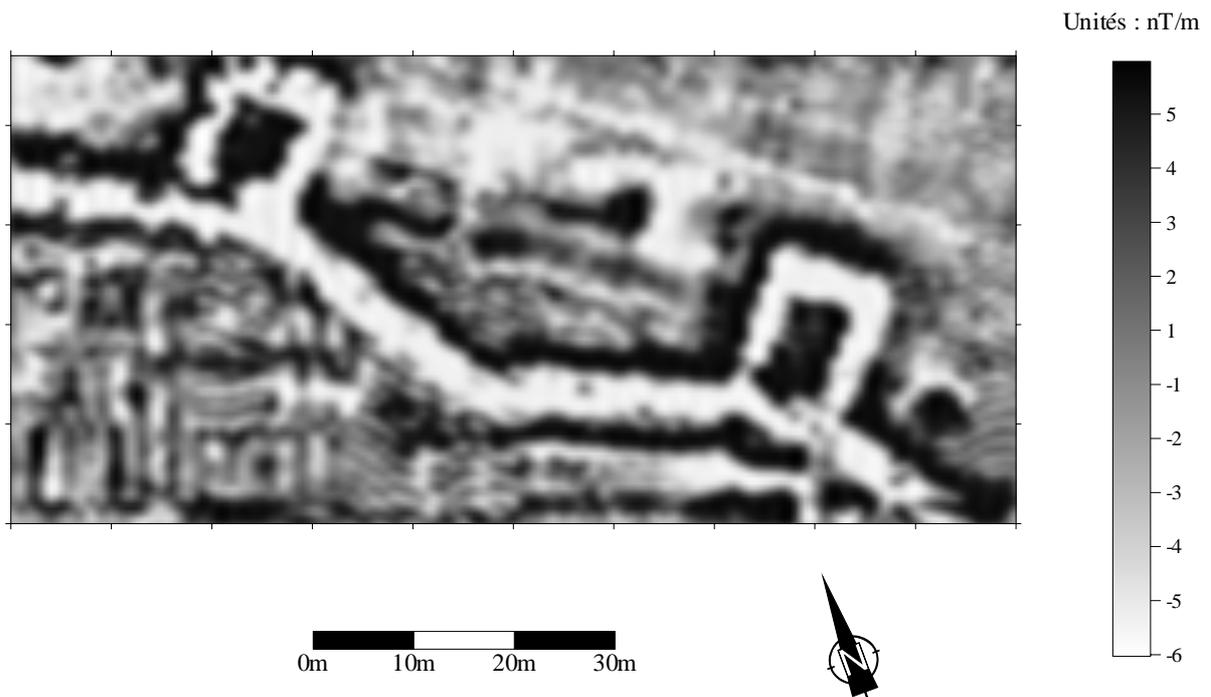
Le site d'Apamée est situé sur une plaine alluviale constituée d'un limon homogène. Dans ce contexte géologique "calme", la méthode magnétique est apparue comme la plus intéressante. Les murs, construits en pierre calcaire, roche non magnétique, présentent un contraste suffisant avec le limon de la plaine, relativement magnétique, pour être détectés par cette méthode. La qualité des cartes obtenues tient aussi au fait que la ville d'Apamée ne présente qu'un seul niveau d'occupation ; l'urbanisme hellénistique de la ville apparaît donc très clairement, sans être recouvert par la présence de vestiges postérieurs à cette période. La présence de nombreux vergers et de terrains cultivés a rendu parfois difficile l'implantation des prospections et en a limité la surface. L'utilisation du gradiomètre au Césium G858 a néanmoins permis d'atteindre un rendement moyen de 0,5 ha/jour et de cartographier, en trois ans, l'essentiel du site (Fig. 0.3), soit une superficie d'environ 25 ha, ce qui représente avec le gradiomètre au Césium plus d'un million de mesures.

## IV. Exploitation des données géophysiques pour l'archéologie

### IV.1. Découverte des fortifications

La reconnaissance du tracé des remparts d'Apamée a été menée en associant aux méthodes archéologiques traditionnelles (prospection pédestre, relevé topographique, fouilles) une série de prospections électriques placées aux endroits stratégiques sur les axes supposés des limites de la ville. Ce travail a permis de localiser sur 700 m la position des remparts Nord et Est et d'en révéler l'organisation générale.

Les murailles suivent un tracé rectiligne rythmé par des tours rectangulaires reliées entre elles par des courtines en chevrons (Fig. 0.4a et b). L'identification du type de courtines a été déterminant pour la datation de l'ouvrage car ce tracé correspond à la description du poliorcète Philon de Byzance (III<sup>ème</sup> siècle av. J.C.). On trouve en effet au livre V de la *Syntaxe mécanique* la mention d'un tracé dit « *en dents de scie* », préconisé cependant pour des reliefs sinueux. Le cas d'Apamée constitue donc une illustration exemplaire d'un principe de l'art militaire en cours à l'époque hellénistique.



*Fig. 0.4a : Prospection magnétique sur les tours 15 et 16 du rempart nord.*

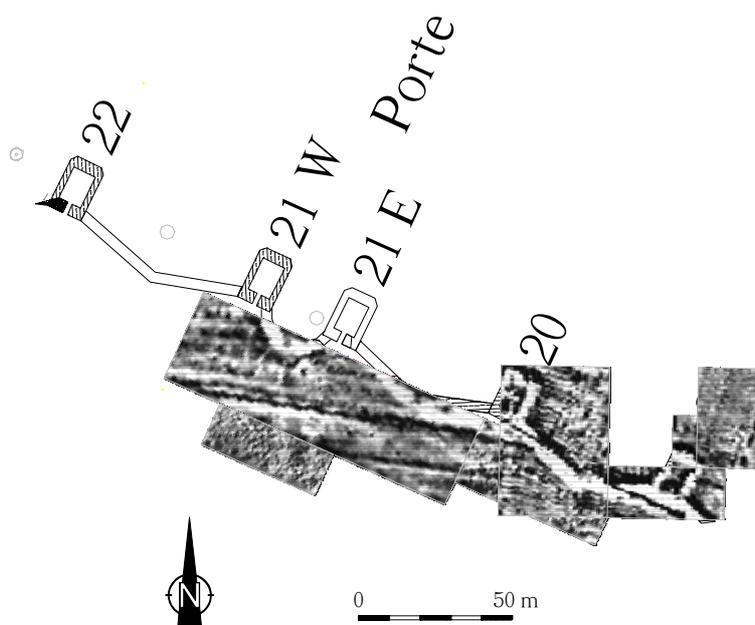
*Les branches de la courtine font chacune 25 m de long pour une épaisseur de 3,5 m ; l'intérieur des tours forme un rectangle de 7 m×11 m, les murs latéraux ayant une épaisseur de 2,5 m et la partie frontale, la plus exposée, atteint 3,5 m.*



*Fig. 0.4b : Fouille de la tour 13.  
Au premier plan, on aperçoit le seuil d'entrée de la tour.*

La prospection magnétique a permis à partir de 1997 non seulement de prolonger le tracé du rempart nord mais aussi de suivre en continu de long segments de la muraille afin d'en préciser les principales caractéristiques. D'après les données géophysiques, on a pu établir l'existence de 23 tours rectangulaires toutes identiques, repérer les changements de longueur des courtines sur le rempart Nord, localiser quatre des portes de la ville et en déterminer la typologie.

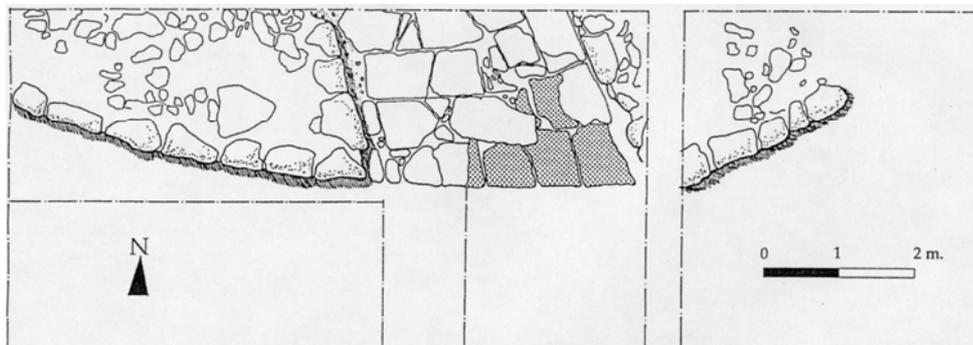
Chacun des remparts est percé de deux portes, toutes identiques. Il s'agit de portes à cour en demi-cercle protégée latéralement par deux tours rectangulaires symétriques distantes d'une vingtaine de mètres. Ce dispositif permet de contrôler efficacement l'accès à la ville en rétrécissant brusquement le passage au moment de franchir la muraille car le seuil de la porte proprement dite n'excède pas 3 m de large. Dans le cas de la porte occidentale du rempart Nord, c'est le mur de la cour de forme semi-circulaire qui a été mis en évidence par prospection magnétique (Fig. 0.5). En revanche, à la porte orientale dont les deux tours symétriques avaient été repérées en géophysique, la prospection n'avait pu être étendue jusqu'à la cour ; une fouille implantée à cet endroit lors de la campagne de 1998 a mis au jour dans l'axe de la porte un seuil percé dans le mur de la cour dont la courbe présente les mêmes caractéristiques que celles observées sur la porte occidentale (Fig. 0.6).



*Fig. 0.5 : Carte prospection magnétique sur le rempart nord. La forme en demi-cercle du seuil de la porte occidentale du rempart nord est clairement visible.*



*Fig. 0.6a : Fouille du seuil de la porte orientale du rempart nord  
Au premier, on aperçoit la courtine en arc de cercle qui vient buter sur la voie  
proprement dite, composée de blocs bien ajustés à surface plane*



*Fig. 0.6b : Plan de la fouille de la porte orientale du rempart nord.*

## IV.2. Etude de l'urbanisme hellénistique

Le site d'Apamée est actuellement recouvert par un village, des vergers et des terrains cultivés, ce qui explique la dispersion et le morcellement des prospections magnétiques. L'assemblage de ces dernières offre néanmoins une image très complète de la ville hellénistique et constitue un document indispensable pour l'étude du plan d'urbanisme. Il s'agit d'un plan de type hippodamien, découpé en îlots de construction identiques séparés par des rues perpendiculaires les unes par rapport aux autres.

D'après les cartes géophysiques, on a pu ainsi estimer la dimension des îlots (105 m×58 m), la largeur des rues et préciser leur orientation par rapport aux fortifications. Les voies s'organisent parallèlement ou perpendiculairement au rempart oriental ; les plus larges (15-17 m) correspondent aux axes menant à l'une des portes de la ville, tandis que les voies secondaires mesurent entre 5 et 7 m de largeur.

Les cartes donnent, en outre, une idée de la densité d'urbanisation de la ville. Les constructions à l'intérieur des îlots sont en effet visibles et montrent dans certains cas des îlots partiellement ou non construits (Fig. 0.7). Cette observation implique soit que le développement d'Apamée a été brusquement stoppé, soit que l'urbanisme s'est développé en ménageant des espaces non construits destinés à des jardins . Il faut cependant remarquer que la répartition des îlots construits, très dense dans la partie nord-ouest de la ville ne correspond pas au schéma généralement reconnu d'un développement urbain à partir du centre. Il semble plus probable que les lots de construction aient été regroupés autour des rues menant aux portes principales de la cité, les portes orientales.

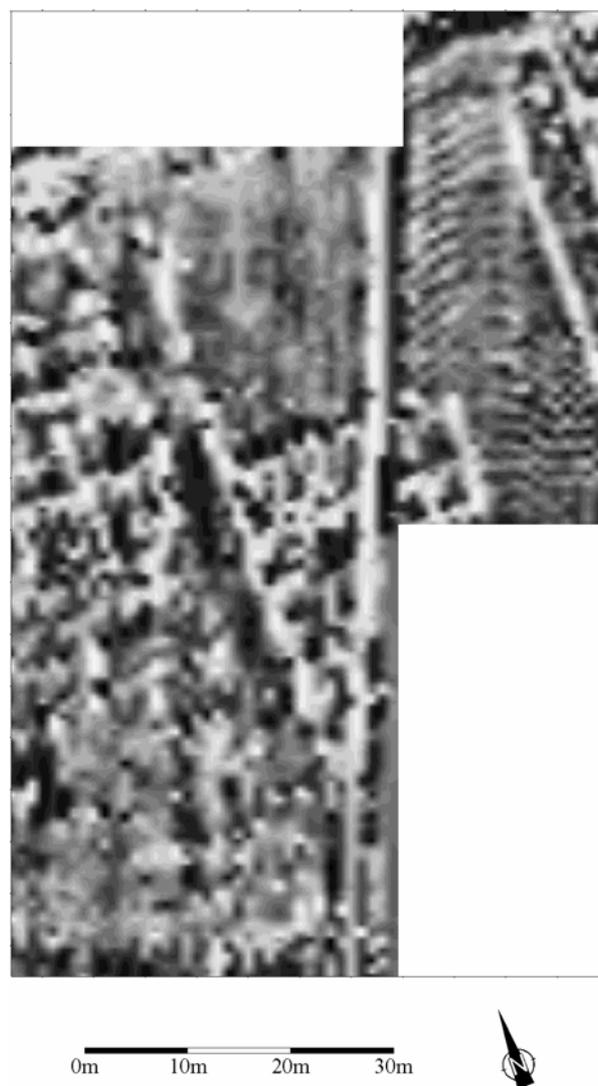
Le schéma urbain ayant été très rapidement révélé par la prospection magnétique, il a paru essentiel de caractériser et de dater, par la fouille, les vestiges ainsi repérés.

Dès les premiers résultats incontestables des prospections, un sondage archéologique a donc été ouvert dans un secteur où une carte magnétique signalait très clairement la présence d'une habitation bordant une rue orientée Est-Ouest (Fig. 0.8), ceci afin de "valider" la méthode magnétique. La fouille a révélé, à 0,45 m de profondeur, des murs en moellons calcaire maçonnés à la terre d'un habitat daté par le matériel de l'époque hellénistique, ainsi qu'une chaussée empierrée, ce qui correspondait très exactement aux anomalies sélectionnées.

A partir de l'assemblage des cartes de prospections dont la fiabilité avait été vérifiée, on a pu déduire un schéma urbain théorique et le projeter sur l'ensemble du site

A ce stade, le programme de fouille s'est attaché à étudier des points névralgiques de la ville signalés par les cartes de prospections, comme les boutiques bordant la rue principale dans le secteur immédiat de la porte méridionale du rempart oriental.

Parallèlement, certains chantiers avaient pour objectif de compléter l'information recueillie en géophysique sur l'organisation de la ville. Les sondages furent donc implantés en priorité dans des zones inaccessibles à la prospection, leur position étant calculée à partir des hypothèses de tracé déduites du schéma urbain théorique. Cette stratégie a permis de confirmer le module théorique des îlots et les orientations des rues dans la partie occidentale de la ville.



*Fig. 0.7 : Réalisée dans la partie nord-est de la ville, cette carte de prospection montre un îlot partiellement construit bordé à l'ouest par une voie puis un autre îlot entièrement aménagé.*

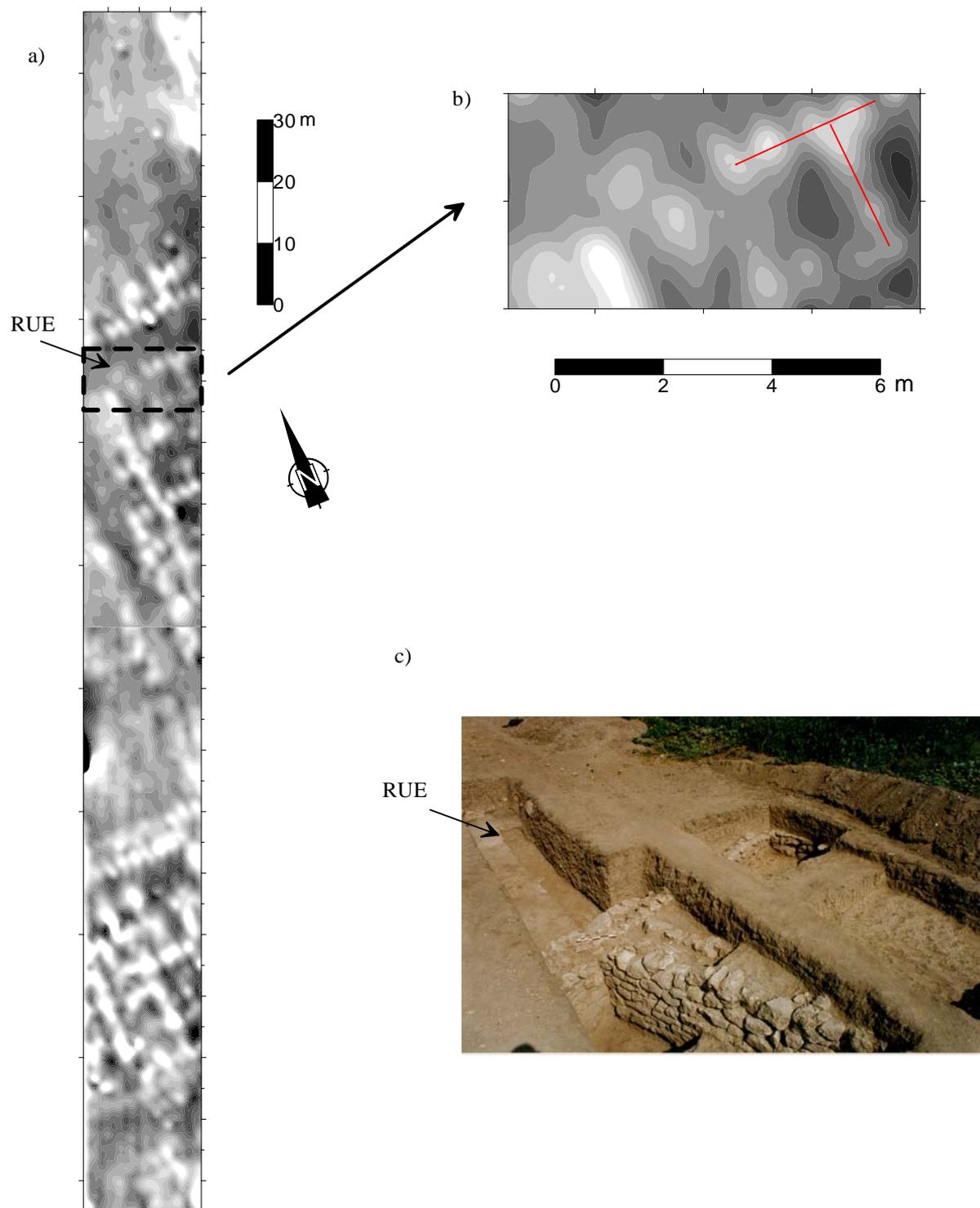
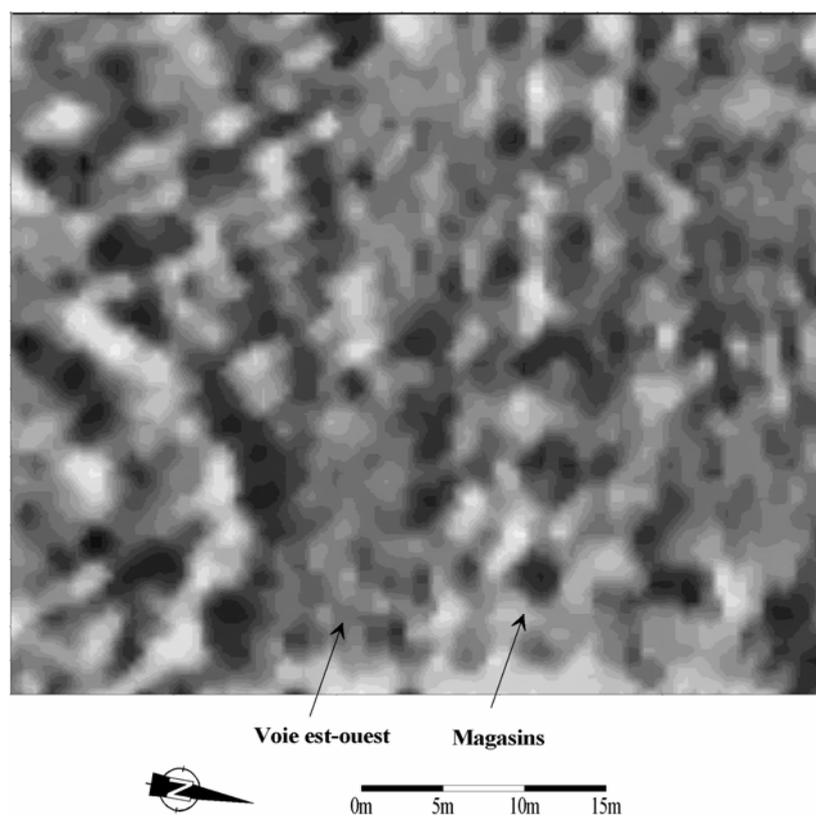


Fig. 0.8 : (a) L'image obtenue par la prospection magnétique permettait une identification et une datation des vestiges par la fouille. (b) Une fouille a donc été ouverte sur une zone sélectionnée selon les indications de la carte. (c) Un sondage a mis au jour deux murs à moins de 50 cm de la surface : un mur de façade d'îlot et un second à l'intérieur de l'habitation : au premier plan, les murs d'habitation ; au deuxième plan, un sondage implanté en travers de la rue hellénistique.



*Fig. 0.9a : Détail de la carte de prospection à l'est de la porte sud du rempart oriental*



*Fig. 0.9b : Fouille des magasins bordant la voie est-ouest, à l'ouest de la porte sud du rempart oriental*

## V. Perspectives d'exploitation des données géophysiques

Dans les deux paragraphes précédents, c'est le dessin en plan des anomalies qui a été utilisé pour étudier la muraille et l'organisation interne de la ville. Les données de prospection constituant la seule source d'information sur la ville dans son ensemble, il convient de les exploiter au mieux et nous disposons pour cela de trois ans avant la publication définitive, sous la forme d'un mémoire qui sera publié sous l'égide du CNRS et du Ministère des Affaires Etrangères. Dans une fouille d'urgence, il est essentiel d'acquérir le maximum d'information possible avant la disparition du site, le « dépouillement » des données et la mise en commun des travaux des différentes spécialités ne venant qu'après.

En ce qui concerne les prospections géophysiques à Apamée, plusieurs points méritent d'être approfondis :

- une estimation de la profondeur ou de l'épaisseur des différents types de structures pour les fortifications, les voies et l'organisation interne des îlots.
- une analyse plus détaillée de l'interprétation des cartes, notamment dans les secteurs plus complexes (zones en bordure du fleuve) marquées par des niveaux de réoccupation romaine ou byzantine.
- une comparaison détaillée des données de fouille et des données géophysiques, là où ont été implantés les sondages archéologiques. Cette démarche implique d'étudier la position des anomalies par rapport à celle des structures identifiées, la nature et la constitution des matériaux de construction utilisés et de leur état de ruine.

Ces travaux nécessitent avant tout une synthèse complète sur SIG de toutes les données archéologiques, topographiques et géophysiques, qui est actuellement en cours de constitution.

De cet ensemble de travaux, seul le premier point a été esquissé en utilisant la déconvolution d'Euler pour préciser la profondeur moyenne des contrastes et réciproquement à partir des résultats de fouille, l'estimation de l'indice structural le mieux adapté.

Si l'on reprend le secteur d'essai utilisée pour la validation de la méthode magnétique sur une zone d'habitation et un niveau de rue (fig. 0.8), la déconvolution d'Euler donne pour le cailloutis calcaire constituant l'empierrement de la rue une profondeur de 0,77 m pour un indice structural  $N=1,02$  (tout à fait normal pour une structure en nappe). Pour le mur avoisinant dont le sommet est beaucoup plus proche de surface, on obtient une profondeur de 0,37 m pour un indice légèrement supérieur à 1,14.

Si l'on considère la tour est de la figure 0.4, pour un ensemble de blocs de 1,50 m d'épaisseur, de 3 m de large et dont le toit se trouve à 0,30 m de la surface, on obtient des profondeurs comprises entre 0,50 m pour des indices proches de 1 et 1 m pour des indices proches de 1,6.

L'analyse de l'extension en profondeur des structures est loin d'être terminée mais les premiers résultats soulignent la difficulté qu'il y a avec la seule méthode magnétique de disposer d'interprétations précises. C'est l'une des raisons qui nous conduisent à utiliser simultanément les méthodes magnétique et électromagnétique.

## **VI. Conclusion**

L'association de la prospection géophysique aux autres méthodes de prospection archéologique a permis de redécouvrir, en quatre campagnes, la cité et d'apporter une source d'informations essentielles à la compréhension des villes hellénistiques de la région.

Grâce au rendement que permet le gradiomètre au Césium, la ville a pu être explorée dans son ensemble, ce qui aurait été irréalisable par les méthodes traditionnelles dans un contexte d'urgence. Mais c'est surtout le plan d'assemblage des prospections qui a constitué le document de référence des recherches archéologiques sur le terrain et qui reste une base de données à exploiter après la disparition du site.

Ce document, mis à jour après chaque campagne, a permis un gain de temps précieux au cours des opérations archéologiques puisqu'il a orienté la stratégie de fouille et facilité l'implantation des sondages au mètre près.

Actuellement, l'étude du plan hippodamien est encore en cours et devrait apporter des informations inédites sur les principes de l'urbanisation hellénistique en Orient. A l'échelle des îlots, il paraît possible, dans les meilleurs cas, de retrouver l'organisation interne des maisons et de dresser une typologie de l'habitat qui a été par ailleurs clairement daté.

L'image géophysique demeurera, dans l'avenir, l'unique témoin de l'existence d'une fondation séleucide sur la rive gauche de l'Euphrate, en face du site de Séleucie-Zeugma, dominant le lac artificiel où seront englouties les ruines d'Apamée.

---

# Chapitre 1 : Propriétés magnétiques des sols

---

## I. Introduction

Depuis les travaux d'Eugène Le Borgne en 1955, l'étude des propriétés magnétiques des sols a montré qu'elle pouvait non seulement rendre compte de la structure du sous-sol en mettant en œuvre des méthodes de prospection, mais aussi permettre d'identifier certains processus pédologiques ou anthropiques affectant le comportement des différents horizons d'un sol.

Les nombreuses études réalisées ont permis d'identifier les minéraux magnétiques responsables des fortes susceptibilités observées et les principaux processus chimiques qui gouvernent leur formation ou leur disparition. Les phénomènes naturels responsables de ces processus peuvent être nombreux mais, pour une région donnée, une étude environnementale permet d'identifier les phénomènes dominants.

Les propriétés magnétiques se sont aussi révélées être un paramètre intéressant dans l'étude de l'impact humain sur les sols. Pour la reconnaissance de certains types d'occupation (action du feu, structures en creux), la susceptibilité magnétique constitue un marqueur d'anthropisation essentiel.

Dans cette partie, nous présentons une synthèse des études réalisées par différents auteurs sur les propriétés magnétiques des sols à partir d'analyses physico-chimiques sur échantillons. Nous tâcherons par la suite d'évaluer dans quelle mesure la prospection géophysique est susceptible d'exploiter ces études et d'apporter par la description des structures *in situ* une information plus complète.

## II. Principes généraux sur le comportement magnétique des sols

E. Le Borgne fut le premier à étudier la susceptibilité magnétique des sols (Le Borgne, 1955). Ses travaux ont permis de dégager les caractéristiques fondamentales des propriétés magnétiques des sols.

L'horizon humifère supérieur A présente généralement une susceptibilité magnétique supérieure aux horizons inférieurs et à la roche mère. Ceci vient du fait que les minéraux responsables du comportement magnétique de l'horizon supérieur peuvent, indépendamment

de la roche mère, apparaît sous l'effet de processus pédologiques d'origine naturelle ou anthropique. La nature de la roche mère joue cependant un rôle dans le comportement magnétique du sol.

Les deux minéraux identifiés par Le Borgne comme responsables des fortes valeurs de susceptibilité observées dans le sol sont la magnétite et la maghémite, toutes deux ferrimagnétiques.

L'analyse granulométrique a en outre montré que ces deux minéraux étaient essentiellement présents dans la fraction argileuse. Ce sont donc les phénomènes pédologiques liés à cette fraction qui vont gouverner le comportement magnétique des sols.

### III. Identification des minéraux magnétiques

#### III.1. La magnétite

La magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) est un oxyde qui cristallise dans le système cubique à face centrée de type spinel inverse (Le Borgne, 1955). C'est un minéral contenant à la fois des ions  $\text{Fe}^{2+}$  et  $\text{Fe}^{3+}$ . Elle peut aussi se retrouver associée à des ions du type :  $\text{Ti}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  ou encore  $\text{Mn}^{2+}$  (Graham et Scollar, 1976). Ces formes substituées se rencontrent couramment dans les roches basiques. De nombreuses études (Le Borgne, 1955 ; Mullins, 1974 ; Maher et Taylor, 1988) ont montré que la magnétite présente dans le sol ne provenait pas exclusivement de la roche mais était formée en partie *in situ*, indépendamment du substrat sur lequel le sol s'est développé.

Dans le sol, la magnétite se forme essentiellement par réduction de l'hématite ( $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), ou de la goethite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{H}_2\text{O}$ ), forme hydratée de l'hématite. La formation de magnétite dépendra donc étroitement des conditions réductrices du milieu, en relation avec la présence de matière organique.

L'existence de certaines bactéries dans le sol peut expliquer la formation d'une partie de la magnétite. Une de ces bactéries, *Aquaspirillum magnetotactium*, a été identifiée dans des sédiments marins (Blakemore, 1975) et contient des chaînes de grains de magnétite (Kalmijn et Blakemore, 1978). Des études récentes (Faßbinder et al., 1990 ; Faßbinder et Stanjek, 1993) ont montré que cette bactérie existait aussi dans les sols présentant des conditions anaérobiques (gley, zones humides). Des agrégats de magnétite ont été observés au microscope électronique. Il s'agit de grains monodomaines, d'une taille de l'ordre de 8 Å, plus petits que ceux observés dans les sédiments marins.

L'importance de ce processus sur les propriétés magnétiques des sols est cependant contestée (Dearing, 1996). La croissance de la population de ces bactéries reste encore mal connue et nécessiterait une étude suivie sur plusieurs années de leur rythme de reproduction dans le sol.

Il est néanmoins évident que les processus abiotiques ne suffisent pas à expliquer la formation de toute la magnétite et que l'action des bactéries doit avoir dans certains contextes une importance non négligeable (Dabas, 1989), surtout si l'on tient compte de la régularité observée dans la taille des grains.

### III.2. La maghémite

La maghémite ( $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) est un oxyde ferrique dont la structure cristalline 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 en effet que des ions  $\text{Fe}^{3+}$  et, pour cette raison, est parfois considérée comme de la magnétite entièrement substituée (Dunlop, 1973). Son aimantation à saturation est légèrement 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.

La maghémite n'existe pas dans la roche non altérée et sa formation ne se réalise que dans le sol sous certaines conditions pédogéniques ou anthropogéniques. Elle peut, comme la magnétite, exister sous des formes impures, associées à des ions  $\text{Na}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{2+}$  ou encore  $\text{Mg}^{2+}$  (Stacey et Banerjee, 1974).

Il existe quatre processus de formation de la maghémite (Mullins, 1977) :

1) par oxydation à faible température (observée en laboratoire entre 150 et 250°C) de la magnétite issue de la roche ou néoformée dans le sol,

2) par des cycles réduction-oxydation liés à des phénomènes naturels de la pédogénèse

(cette partie englobe toutes les transformations d'oxydes ou d'hydroxydes de fer peu magnétiques en magnétite ou en maghémite. Ces transformations restent mal connues car les phénomènes auxquels elles sont liées sont nombreux et il est parfois difficile d'évaluer lesquels d'entre eux jouent un rôle dominant. Nous allons toutefois tenter dans la partie suivante d'évaluer l'influence des principaux phénomènes susceptibles d'agir dans le cadre de la pédogénèse),

3) comme résultat d'une chauffe *in situ* (Le Borgne, 1960a ; Mullins, 1974 ; Graham et Scollar, 1976)

(dans ce cas, la maghémite est obtenue de façon indirecte, il s'agit tout d'abord d'une réduction de l'hématite en magnétite suivie d'une oxydation de cette dernière en maghémite au contact de l'air).

4) par déshydratation de la lépidocrocite (Le Borgne, 1955 ; Sheffer et al., 1959) (cette réaction a lieu dans des milieux humides à l'origine (gley) entre 275 et 410°C, elle nécessite donc un chauffage du sol important et doit donc probablement avoir lieu en même temps que la réaction (3)).

Nous voyons que dans les trois premiers cas, la formation de maghémite dépend de la magnétite présente initialement dans le sol ou formée lors de la phase réductrice du processus. Seule la déshydratation de la lépidocrocite aboutit sans cet intermédiaire à la formation de maghémite. Toutefois, ce processus nécessite des températures plus élevées et se produit donc généralement lors d'une combustion (feu naturel ou artificiel).

Le comportement magnétique d'un sol dépendra donc avant tout de sa concentration en magnétite. Durant la phase d'oxydation des différents processus, seule une fraction de la magnétite se transforme en maghémite. Ces deux oxydes sont donc étroitement liés et il faut s'attendre à leur présence simultanée.

### III.3. Autres minéraux

#### III.3.1. La greigite

La greigite ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ) est un minéral ferrimagnétique, de même structure que la magnétite ou la maghémite, connu pour se former dans les niveaux sédimentaires marins ou lacustres. Une étude récente (Stanjeck et al., 1994) a montré qu'elle pouvait aussi être présente dans des sols possédant des conditions anaérobiques suffisantes (gley, zones humides).

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).

Dans les deux cas, la formation de greigite nécessite un milieu anaérobique, riche en matière organique et en sulfures de fer (smythite, mackinawite, pyrite) (Hoffmann, 1992).

Il semblerait que ce soit le deuxième processus qui soit à l'origine de la greigite présente dans les sols (Stanjek et al., 1994). La taille des grains est inférieure à celle de ceux qui sont d'origine sédimentaire. Les cristaux formés se situent dans le domaine superparamagnétique mais ils forment des agrégats qui se comportent magnétiquement comme des monodomaines et se caractérisent par une aimantation rémanente stable (Faßbinder et Stanjek, 1994).

Il existe pour le moment peu de données et d'analyses concernant l'étude de la greigite dans les sols. Il est néanmoins certain que la présence de ce minéral peut considérablement modifier le comportement magnétique d'un sol. Un horizon contenant de la greigite se remarque par une susceptibilité magnétique supérieure à celle de l'horizon humifère supérieur (Faßbinder et Stanjek, 1994).

### III.3.2. L'hématite

L'hématite ( $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) est un minéral antiferromagnétique, à faible ferromagnétisme au-dessus de  $-15^\circ\text{C}$ , 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.

Outre le fait qu'elle constitue, comme nous l'avons vu, un élément essentiel dans la production de magnétite, l'hématite est l'oxyde de fer le plus répandu dans les roches. Il s'agit aussi du principal responsable de l'aimantation rémanente mesurée dans les terres cuites (Thellier, 1938). Elle peut donc être considérée comme un des marqueurs de l'anthropisation des sols mais qui, au contraire de la magnétite ou de la maghémite, se manifestera par son rôle dans l'aimantation rémanente.

## IV. Phénomènes naturels liés à la formation de minéraux magnétiques dans le sol

### IV.1. Influence de la géologie

Le Borgne avait noté que les propriétés magnétiques de l'horizon humifère supérieur étaient indépendantes de la roche sur laquelle il s'est développé. Même s'il est vrai que la production de magnétite ou de maghémite est liée à des phénomènes d'ordre pédologiques, c'est de la roche mère que dépendra le "potentiel magnétique" d'un sol ou, en d'autres termes, l'aptitude d'un sol à produire des minéraux magnétiques. A partir de trois types de mesure de susceptibilité sur échantillon, Tite et Mullins ont défini deux paramètres permettant de rendre compte du comportement magnétique des sols (Tite et Mullins, 1971) :

$\chi_0$  : susceptibilité magnétique initiale

$\chi_H$  : susceptibilité magnétique en atmosphère réductrice (maintenue par une circulation d'hydrogène)

$\chi_N$  : susceptibilité magnétique en atmosphère réductrice lors de la chauffe (circulation d'azote) puis oxydante lors du refroidissement (circulation d'air).

A partir de ces trois mesures, on calcule alors les rapports :

$\chi_0/\chi_N$  : quantité de magnétite transformée en maghémite appelée "facteur de conversion"

$\chi_N/\chi_H$  : "pouvoir réducteur de la matière organique".

Nous verrons plus loin que le calcul de ces facteurs est particulièrement important dans l'étude des sols anthropisés pour évaluer "l'intensité" de l'occupation nécessaire pour modifier les propriétés magnétiques.

Les produits d'altération de la roche se caractérisent généralement par une augmentation de la concentration en fer, sous des formes peu magnétiques (goethite notamment) (Le Borgne, 1955) et qui, par des processus pédogénétiques, formeront de la magnétite. Il apparaît donc que même si les conditions pédologiques sont favorables à la formation de minéraux magnétiques, cette dernière dépendra étroitement de la nature de la roche, dont dépend indirectement la formation de minéraux magnétiques.

Certaines roches, notamment d'origine volcanique, peuvent posséder une teneur élevée en oxyde de fer. Si, en outre, le sol est peu développé, ce dernier montrera d'importantes variations régionales de la susceptibilité, directement liées à la concentration des minéraux magnétiques contenus dans la roche.

La perméabilité des roches, en outre, agit sur les cycles d'humification-dessiccation des sols qui contrôlent en partie le caractère réducteur ou oxydant du milieu.

#### IV.2. Influence du climat

Des mesures réalisées sur des sols anglais et italiens ont montré que le rapport  $\chi_0/\chi_N$  était bien plus important sur les sols italiens (Tite et Linington, 1975). Cette différence semble être due au climat italien marqué par des hivers froids et humides et des étés chauds et secs sur des sols bien drainés.

Un contraste climatique suffisamment important peut, par conséquent, créer les conditions réductrices, puis oxydantes, nécessaires à la formation successive de magnétite et de maghémite, si le contexte pédologique est favorable. Le fait que les sols étudiés en Italie étaient bien drainés a certainement contribué, en plus du climat, à créer des conditions favorables.

Ces résultats ont été confirmés par des études réalisées sur les lœss chinois qui ont montré l'influence climatique sur les propriétés magnétiques des paléosols. Dans ce contexte, la susceptibilité magnétique est apparue comme un indicateur fiables des processus pédogéniques dus au climat (Heller et Tung-Sheng, 1986 ; Heller et al., 1991 ; Maher et Thompson, 1992 ; Verosub et al., 1993).

#### IV.3. Erosion des sols

L'horizon humifère supérieur subit nécessairement une érosion plus ou moins importante. Sous contrôle des conditions climatiques locales, les effets topographiques ou éoliens sont susceptibles de modifier de manière significative les propriétés magnétiques ; ces processus agiront en effet de façon importante sur la fraction argileuse qui contient les constituants les plus magnétiques.

L'effet de pente, associé à un climat pluvieux, peut entraîner, par des ravinements, des déplacements importants de la terre constituant l'horizon superficiel ; on constate que les variations locales de la susceptibilité magnétique sont alors étroitement corrélées à la topographie du terrain (Le Borgne, 1955 ; Singer et Fine, 1989).

L'effet éolien est un phénomène d'érosion important dans le cas des propriétés magnétiques des sols puisque c'est sur la fraction argileuse du sol, la plus fine et la plus légère, que son influence sera dominante. Les nombreuses études réalisées sur les lœss chinois ont permis de bien étudier le comportement magnétique des dépôts éoliens : les lœss

possèdent une susceptibilité magnétique inférieure à celle des paléosols mais particulièrement uniforme, même à l'échelle régionale (Heller et al., 1991).

## V. Cas des sols anthropisés

Dans le cadre de l'étude des propriétés magnétiques des sols, on désigne par « sols anthropisés » ceux dont les propriétés magnétiques sont différentes de celles qu'ils auraient eues par l'action de phénomènes exclusivement naturels. La répétition de feux est le principal processus d'anthropisation, de modification des propriétés magnétiques, elle enrichit les horizons supérieurs en minéraux magnétiques. Ceux-ci restent dans ces horizons ou diffusent plus profondément, mais ils peuvent s'accumuler dans les structures en creux (fosses, tranchées, trous de poteau,...) lors de leur comblement.

L'action du feu sur la susceptibilité des sols a fait l'objet de plusieurs études (Le Borgne, 1960a ; Mullins, 1974 ; Rummery et al., 1979 ; Dearing et al., 1996). Ces études ont montré que le volume de sol affecté restait très limité du fait de la mauvaise diffusion de la chaleur. Un sol qui a subi un incendie ne présentera une forte susceptibilité que sur les deux premiers centimètres. Ce phénomène peut être un peu plus important sur des sols riches en matière organique mais demeurera de toute façon de faible ampleur et ne suffit donc pas toujours à caractériser l'anthropisation. Seuls les sols ayant connu une occupation sur de longues périodes possèdent du fait du brassage une susceptibilité magnétique particulièrement forte sur plusieurs centimètres ; le feu étant, comme nous l'avons vu, une des causes de formation de la maghémite.

La susceptibilité magnétique ne constitue pas non plus un indicateur fiable quant à l'éventuelle utilisation agricole d'un terrain. Le procédé de culture sur brûlis (écobuage), même répété plusieurs années, ne modifie pas toujours de façon significative les propriétés magnétiques des sols. Il peut exister certains cas où le contraste magnétique ne sera pas suffisant pour détecter les structures en creux en prospection magnétique (Tite, 1972). Le "pouvoir réducteur" et le "facteur de conversion" définis plus haut rendent bien compte de ce problème : si un sol contient peu d'oxydes, le rapport  $\chi_0/\chi_N$  devra être important pour qu'une anthropisation du sol due à une combustion puisse être détectée. Il faudra alors que cette occupation ait été suffisamment intense et continue sur une longue période. Au contraire, sur un sol riche en oxydes, le rapport  $\chi_0/\chi_N$  n'aura pas besoin d'être particulièrement élevé ; il sera alors possible de détecter des zones d'occupation sur de courtes périodes dans le temps (Tite et Mullins, 1971).

La maghémite a longtemps été considérée comme le marqueur spécifique de l'anthropisation d'un sol. La formation de magnétite par des bactéries remet en question cette affirmation. Des études réalisées sur des fosses d'origine anthropique ont en effet montré que ces dernières constituaient un milieu particulièrement favorable à l'activité bactérienne et donc à la production de magnétite. Dans ce type de structure, la concentration de magnétite serait par conséquent un marqueur d'anthropisation (Faßbinder et Stanjeck, 1993).

## VI. Paramètres magnétiques mesurables *in situ* en prospection

### VI.1. Susceptibilité magnétique

La susceptibilité magnétique rend compte de la capacité d'un corps à s'aimanter sous l'action d'un champ magnétique. Elle peut être exprimée en termes de susceptibilité volumique ou de susceptibilité massique.

La susceptibilité volumique est définie par la relation :

$$\chi_v = J/H \quad (\text{sans dimension}) \quad (1)$$

où J représente l'intensité de l'aimantation et H le champ magnétique appliqué.

La susceptibilité massique est définie par la relation :

$$\chi_m = \chi_v / \rho \quad (\text{unité : m}^3/\text{kg}) \quad (2)$$

$\rho$  étant la masse volumique de l'échantillon.

La susceptibilité mesurée ne correspond pas en fait à la susceptibilité "vraie" de l'échantillon. Le champ magnétique qui agit sur l'échantillon est inférieur au champ appliqué d'une quantité  $NJ$  due à l'aimantation induite de l'échantillon (champ démagnétisant) qui va s'opposer au champ appliqué. La valeur de  $N$  va dépendre de la forme des grains de minéraux : pour des grains très allongés,  $N$  tendra vers 0 mais aura une valeur avoisinant 1/3 pour des grains ayant une forme proche de la sphère (Mullins, 1977). Toutefois, comme  $J \ll H$  on néglige le champ démagnétisant.

Suivant leur taille, les grains seront multidomaines, monodomaines ou superparamagnétiques pour les plus fins. Pour les monodomaines, l'intensité du champ agissant dépendra de son orientation par rapport à l'axe d'aimantation facile du grain (grand axe). Pour les multidomaines, l'application d'un champ magnétique suffisamment important

entraînera un déplacement des parois internes favorisant les domaines dont l'orientation correspond à celle du champ appliqué.

Les grains les plus petits ont un comportement superparamagnétique qui se traduit par un moment magnétique induit particulièrement élevé : sous l'action d'un champ magnétique, ils auront tous tendance à s'orienter dans la direction de ce champ (comportement paramagnétique) mais la valeur de leur moment entraînera des susceptibilités très élevées. Cette fraction de grains tient une place importante dans le comportement magnétique des sols.

## VI.2. Aimantation rémanente

Certaines roches ou sédiments peuvent posséder une aimantation rémanente acquise à la suite de phénomènes naturels. Il s'agit essentiellement d'une aimantation thermorémanente produite par des minéraux magnétiques chauffés jusqu'à leur point de Curie puis refroidis dans un champ magnétique : c'est le cas des roches d'origine volcanique. Cette aimantation rémanente est particulièrement stable et conserve la direction du champ présent au moment du refroidissement. Cette aimantation peut être aussi d'origine anthropique. Les terres cuites ainsi que les structures artisanales liées à l'art du feu (fours de potiers, de verriers ou métallurgiques) possèdent une aimantation thermorémanente particulièrement élevée.

L'application d'un champ magnétique sur un échantillon peut entraîner la formation d'un autre type d'aimantation rémanente, dépendant du temps : l'aimantation rémanente visqueuse dont le mécanisme sera précisé ci-dessous. Cette aimantation peut être importante pour les grains magnétiques de petite taille, situés à la frontière monodomaine/superparamagnétique, qui peuvent être responsable d'une grande part de l'aimantation rémanente des matériaux.

## VI.3. La viscosité magnétique

Lorsqu'un champ magnétique est brusquement appliqué puis maintenu sur un matériau, les grains et les domaines magnétiques ne peuvent atteindre instantanément l'équilibre énergétique. Le moment magnétique va alors augmenter peu à peu, du fait d'une augmentation progressive du nombre de grains parallèles au champ ou d'un déplacement progressif des positions des parois des domaines. Ce phénomène dépendant du temps est appelé viscosité magnétique ou traînage magnétique.

Cette acquisition ou cette perte d'aimantation, qualifiée de ce fait de visqueuse, est caractérisée par une constante de temps  $\tau$ , appelé temps de relaxation. La théorie de Néel (Néel, 1949) constitue le premier modèle rigoureux sur l'étude du comportement de la viscosité magnétique : le temps de relaxation est exprimé en fonction des paramètres spécifiques aux grains d'oxydes (volume, taille et partition en domaines magnétiques) ainsi que de leurs caractéristiques magnétiques (champ coercitif et aimantation à saturation).

Les premières études sur échantillon de la viscosité magnétique ont été réalisées par E. Le Borgne, sur des échantillons dont le temps de relaxation variait de 100s à 10<sup>6</sup>s (Le Borgne, 1960b). Pour différentes intensités de champ, il a vérifié expérimentalement la théorie de Néel et en a déduit une approximation de la taille des grains magnétiques sur des sols chauffés ou non.

Colani et Aitken (1966b) sont à l'origine des premiers essais de mesure sur des sols anthropisés aux constantes de temps correspondant à la prospection électromagnétique basse fréquence, de 10<sup>-6</sup>s à 10<sup>-2</sup>s. Ils ont montré que des structures en creux (fosses, fossés) présentaient une viscosité magnétique supérieure à celle du milieu environnant et pouvaient être détectées à l'aide d'un appareil T.D.E.M. (Colani et Aitken, 1966a).

Les travaux de Mullins et Tite (Mullins et Tite, 1973a et 1973b) ont permis d'analyser la taille des grains à partir de leur viscosité magnétique grâce à l'utilisation du diagramme de Preisach. Ces travaux ont en outre permis d'établir une relation simple entre la viscosité magnétique observée en domaine temps, et la mesure de la susceptibilité en quadrature en domaine fréquentiel. La thèse de M. Dabas (Dabas, 1989) constitue une synthèse complète des travaux réalisés sur ce paramètre et a permis de corroborer les résultats de Mullins et Tite. Ce travail a, en outre, apporté des résultats quantitatifs sur la mesure de susceptibilité en quadrature (Dabas et al., 1992), qui ont permis de vérifier la relation qui relie la viscosité en domaine temps et la susceptibilité en quadrature en domaine fréquentiel. A partir de là, il est possible (Tabbagh et Dabas, 1996) d'étalonner les appareils T.D.E.M. de façon à exprimer toutes les mesures en termes de susceptibilité en quadrature.

## VII. Conclusion

L'étude des propriétés magnétiques des sols sur échantillons relève de trois grands thèmes de recherche : identification des minéraux magnétiques et de leurs caractéristiques (taille, répartition, type d'aimantation), processus chimiques conduisant à la formation de ces minéraux et phénomènes naturels ou anthropiques conduisant à l'activation de ces processus.

---

Ces travaux sont généralement réalisés à partir d'échantillons prélevés de façon plus ou moins dense et régulière. L'apport de la prospection géophysique peut être considérable pour ces études car elle permet de réaliser une cartographie complète d'une zone définie. La méthode électromagnétique en particulier, permet, par une prospection large maille, de couvrir de grandes surfaces. Il est donc intéressant de voir maintenant quel type d'information les méthodes géophysiques de prospection peuvent fournir sur les propriétés magnétiques des sols et dans quelles mesures elles sont susceptibles de venir compléter les études sur échantillon pour mieux comprendre les processus naturels ou anthropiques qui agissent dans la pédogénèse.

---

## Chapitre 2 : Mesure des propriétés magnétiques des sols en prospection géophysique

---

### I. Méthode électromagnétique

#### I.1. Introduction

La mesure des propriétés magnétiques en prospection électromagnétique, c'est-à-dire en utilisant des champs variables dans le temps, est relativement ancienne en prospection minière, notamment en Suède. Toutefois, ce n'est que récemment qu'elle a donné lieu à des interprétations quantitatives et que son emploi a été envisagé dans le domaine de l'environnement et du génie civil. En prospection archéologique, par contre, elle a fait l'objet d'un effort de recherche important depuis une trentaine d'années.

Les premières applications de la méthode électromagnétique ont eu lieu peu après la deuxième guerre mondiale en profitant de l'existence d'appareils développés pour la détection de mines. Il s'agissait de détecteurs de métaux munis d'un dispositif à boucles. Mais il faut attendre les années 60 pour que, cherchant à systématiser son utilisation comme alternative à l'emploi de la méthode électrique, jugée trop lente et trop contraignante du fait qu'elle nécessite de planter des électrodes dans le sol, on prenne pleinement conscience de son intérêt et de ses possibilités pour la mesure des propriétés magnétiques.

L'intérêt de cette méthode est de déterminer en un point donné la valeur absolue de la susceptibilité magnétique du sol, c'est-à-dire d'une propriété physique intrinsèque de celui-ci, distincte de la résistivité. Cette particularité a ouvert la voie à l'application "large maille" qui permet de caractériser le comportement magnétique du sol sur de grandes surfaces.

#### I.2. Principes généraux

Les équations de Maxwell permettent de rendre compte du comportement des champs. En un point d'un milieu linéaire, homogène et isotrope, elles s'écrivent :

$$\begin{cases} \nabla(\mu.H) = 0 & (1) \\ \nabla(\varepsilon.E) = q & (2) \\ \nabla \times E = -\mu.\frac{\partial H}{\partial t} & (3) \\ \nabla \times H = \sigma.E + \varepsilon.\frac{\partial E}{\partial t} & (4) \end{cases}$$

avec : E      champ électrique  
H      champ magnétique  
 $\mu$       perméabilité magnétique  
 $\varepsilon$       permittivité diélectrique  
q      densité volumique de charge  
 $\sigma$       conductivité électrique

*A priori*, trois propriétés interviennent dans les phénomènes électromagnétiques et la séparation de leurs effets peut s'avérer délicate. L'approximation basse-fréquence (BF) consiste à considérer que les courants de déplacement  $\varepsilon \frac{\partial E}{\partial t}$  sont négligeables devant les courants de conduction  $\sigma E$ . Sous cette approximation, seules deux propriétés interviennent. Les appareils électromagnétiques utilisés ici fonctionnent dans le domaine BF. L'équation de Maxwell-Ampère (équation 4) se réduit alors à :

$$\nabla \times H = \sigma.E \quad (5)$$

De cette approximation, on peut déduire que les champs électrique et magnétique vérifient l'équation de diffusion :

$$\begin{cases} \nabla^2 E - \sigma\mu \frac{\partial E}{\partial t} = 0 \\ \nabla^2 H - \sigma\mu \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (6a \text{ et } 6b)$$

Les courants induits par le champ électromagnétique ont alors tendance à se concentrer au voisinage de la surface ce qui limite la profondeur d'investigation. Ce phénomène porte le nom d'effet de peau et est caractérisé par la longueur  $p$  (profondeur de pénétration ou *skin depth* en anglais) :

$$p = \sqrt{\frac{2}{\sigma\mu\omega}} \quad (7)$$

où  $\omega$  est la pulsation.

En général les variations de la conductivité, bien plus importantes que les variations de la perméabilité magnétique, interdisent toute mesure de la susceptibilité magnétique. Néanmoins, dans le cas des faibles nombre d'induction ( $L^2\sigma\mu\frac{\partial}{\partial t} \ll 1$  où L est une longueur caractéristique de la mesure, écartement émetteur-récepteur, diamètre de la spire émettrice, taille des structures), la réponse due à la conductivité du terrain est d'une part suffisamment faible et d'autre part en quadrature par rapport au champ primaire, ce qui permet de mesurer la susceptibilité magnétique du milieu avec la réponse en phase.

Pour la mesure des propriétés magnétiques, on se place toujours dans ce cas et la profondeur d'investigation est limitée par L et non par p.

### I.3. Sources de champ primaire utilisées en prospection de subsurface

Les sources dites lointaines, comme les antennes radios, émettant dans le domaine VLF peuvent être utilisées en prospection géophysique : leur champ primaire a l'avantage d'être uniforme, ce qui dote les appareils d'une bonne profondeur d'investigation, mais elles correspondent à un grand nombre d'induction ( $L \rightarrow \infty$ ) et ne permettent pas la mise en évidence des propriétés magnétiques puisque, dans le sous-sol, les variations de perméabilité magnétique sont toujours beaucoup plus faibles que celles de conductivité.

Si l'on cherche à limiter la variation spatiale du champ primaire, on utilisera de grandes boucles, mais il est aussi possible d'utiliser comme source des dipôles magnétiques (bobines) : le champ primaire créé par ce dipôle correspond alors à une décroissance rapide du signal (en  $1/r^3$ ) et pose des problèmes en termes de profondeur d'investigation. Malgré ce handicap, l'utilisation de ce type de source reste particulièrement intéressant : très facile à déplacer et ne nécessitant aucun contact avec le sol, il est d'une utilisation souple et rapide.

L'émission d'un champ primaire va créer dans le sol des courants induits (courants de Foucault) dont l'intensité va dépendre de la conductivité du sol et une aimantation proportionnelle à la susceptibilité magnétique du sol. Cette aimantation tout comme les courants de Foucault produit un champ secondaire.

La susceptibilité magnétique est un paramètre complexe comportant une composante en quadrature, celle-ci contribuera à la réponse du sol en quadrature et se superposera algébriquement à la réponse due à la conductivité. L'existence d'une composante en quadrature correspond au phénomène de "viscosité magnétique" ; on écrit alors :

$$\chi = \chi_p - i\chi_q$$

avec :  $\chi_p$  susceptibilité magnétique apparente

(composante en phase)

$\chi_q$  viscosité magnétique apparente

(composante en quadrature)

La valeur de  $\chi_q$  est en général 5 à 8 % de celle de  $\chi_p$  (Dabas, 1989) et pose donc un problème pour la détermination d'une valeur précise de la conductivité électrique. La première solution adoptée a été de corriger la réponse en quadrature en lui ajoutant 6% de la valeur de la réponse en phase (Tabbagh, 1982). Dans le cas de sols conducteurs, on peut estimer cette solution satisfaisante car la réponse en quadrature rend compte essentiellement des variations de la conductivité du sol. Mais dans le cas de milieux plus résistants, la réponse de la conductivité devient très faible et il est difficile de savoir si les variations observées sont dues à celle-ci ou à la viscosité magnétique (Parchas, 1978).

Des études récentes réalisées sur la viscosité magnétique (Dabas, 1989) permettent aujourd'hui d'envisager la dissociation des réponses en quadrature de la conductivité électrique et de la viscosité magnétique. La réponse de la conductivité électrique est proportionnelle à la fréquence utilisée pour la mesure, ce qui n'est pas le cas de la viscosité magnétique pour la plupart des sols. Une mesure réalisée à deux fréquences différentes devrait donc permettre de déterminer la valeur de la viscosité magnétique et de restituer la conductivité, même pour des milieux peu conducteurs. La conception d'un appareil de mesure de viscosité magnétique en transitoire ou la calibration des appareils T.D.E.M., comme le DECCO, sont aussi possibles (Tabbagh et Dabas, 1996).

#### I.4. Les appareils Slingram

La méthode Slingram est basée sur l'utilisation de deux bobines magnétiques dans une configuration dipôle-dipôle : une émettrice (assimilable à une source ponctuelle) et une réceptrice (assimilable elle aussi à un point) mesurant le champ secondaire. La réponse du sol est exprimée par le rapport du champ secondaire en un point sur le champ primaire ( $H_s/H_p$ ) en ce même point, ceci afin d'avoir un résultat indépendant du moment magnétique. En faible nombre d'induction, ce rapport est exprimé en ppm.

Les appareils de type Slingram permettent d'effectuer la mesure simultanée de la susceptibilité magnétique apparente (proportionnelle à la réponse en phase) et de la conductivité électrique apparente (proportionnelle à la réponse en quadrature) (Tite et Mullins, 1970 ; Tabbagh, 1974a). Le calcul de la réponse d'un sol tabulaire à n couches ainsi

que la détermination d'un "zéro vrai" pour chaque appareil utilisé a permis une mesure exacte de ces deux paramètres (Tabbagh, 1982).

### I.5. Systèmes à boucles

Dans de tels systèmes, l'émission et la réception sont assurées par des boucles de surface importante. Ils peuvent fonctionner avec une seule boucle jouant à la fois le rôle d'émetteur et de récepteur, ou avec deux boucles, concentriques ou déportées. Une boucle constitue une source étendue et non ponctuelle ; le calcul théorique du champ primaire est par conséquent différent et dépendra du rayon de la boucle. Nous l'avons effectué en tenant compte des contrastes de perméabilité magnétique (Benech et Marmet, 1999) et il est présenté en annexe 1. Théoriquement, ces appareils sont capables, comme les appareils Slingram, de réaliser une mesure simultanée de la susceptibilité magnétique apparente et de la résistivité électrique apparente, mais, comme nous le verrons ci-après, la dissociation des deux réponses est plus difficile pour ce type de sources qu'avec un dipôle.

### I.6. Historique du développement des appareils et perspectives

#### I.6.1. Magnétisme

La méthode magnétique est, avec l'électrique, l'une des plus anciennes utilisée en prospection archéologique. Le magnétomètre à protons à précession libre (fig. 2.1) fut à l'origine de cette application ; il est encore utilisé aujourd'hui mais le développement de gradiomètres « fluxgate » a permis un rendement bien supérieur, puis celui de magnétomètres à pompage optique (utilisables aussi en gradiomètre (fig. 2.2)) dont la précision de 0,01 nT a accru les performances de la méthode. Plusieurs livres traitent de façon exhaustive de l'évolution des magnétomètres et des gradiomètres : nous renvoyons en particulier dans la bibliographie à l'ouvrage de W.M. Telford pour les applications géophysiques en général (Telford et al., 1990) et à celui de I. Scollar pour les applications à l'archéologie (Scollar et al., 1990).



*Fig. 2.1 : Magnétomètre à proton OMNI IV (EDA)*

*La sonde est portée à 0,30 m au-dessus du sol afin de se limiter aux effets de subsurface.*



*Fig. 2.2 : Le gradiomètre au Césium G858 de Geometrics*

### I.6.2. Electromagnétisme

Si les premiers appareils utilisant la méthode électromagnétique apparaissent peu après la deuxième guerre mondiale, il semble que, dans le domaine archéologique, leur utilisation se soit longtemps limitée à la détection des métaux. Il faut attendre le milieu des années 60 pour que des appareils électromagnétiques basse fréquence soient utilisés pour recherche de structures archéologiques. Deux expérimentations vont être menées en Angleterre : la première sera réalisée avec le SCM (soil conductivity meter) (Howell, 1966 et 1968), un appareil Slingram composé de deux boucles perpendiculaires entre elles et distantes de 1 m et utilisant une fréquence de 4 kHz ; la deuxième utilisera le DECCO, un appareil TDEM (Colani et Aitken, 1966a et b). Ces prospections ont montré que la réponse de ces appareils était plutôt corrélée avec les propriétés magnétiques du sol qu'avec les propriétés électriques. Les études théoriques menées par Tite et Mullins sur ce sujet (Tite et Mullins, 1969 et 1970) ont montré que le SCM mesure en fait la susceptibilité magnétique apparente du sol, mais aussi qu'il était théoriquement possible pour des appareils Slingram de mesurer, en utilisant un signal sinusoïdal, à la fois la susceptibilité magnétique apparente (composante en phase) et la conductivité électrique apparente (composante en quadrature).

#### *I.6.2.1. Appareils Slingram*

Les appareils Slingram vont alors être l'objet de recherches approfondies : les résultats de Tite et Mullins sont confirmés par des tests réalisés en France (Tabbagh, 1974a) avec l'EM15 (Geonics), comprenant deux bobines parallèles entre elles, inclinées de 35° par rapport à la verticale et distantes de 0,83 m, et fonctionnant à une fréquence de 16 kHz. Cet appareil ne permettait pas cependant d'effectuer la double mesure en phase et en quadrature ; le faible écart entre les bobines constituait en outre un gros handicap quant à la profondeur d'investigation. C'est pourquoi un nouvel appareil a été construit au CRG de Garchy (France) : le SH3 (fig. 2.2) (Tabbagh, 1974b ; Parchas et Tabbagh, 1978 ; Parchas, 1979). Les bobines de cet appareil possèdent la même orientation que pour l'EM15 mais sont distantes de 1,5 m, ce qui le dote d'une profondeur d'investigation de l'ordre de 0,70 m pour la réponse en phase (Tabbagh, 1982). Les développements ultérieurs ont été axés sur l'amélioration de la profondeur d'investigation et ont débouché sur l'élaboration du CS150 (fig. 2.3) (Tabbagh, 1986b ; Beaussillon et al., 1996), un appareil bifréquentiel fonctionnant à 4,4 kHz et 10 kHz, les bobines étant perpendiculaires entre elles et l'une étant d'axe vertical ; la distance de

1,50 m a été conservée afin de ne pas perdre en résolution latérale au profit de la profondeur d'investigation. L'étude expérimentale de cet appareil est encore en cours.

Quelques appareils sont aussi apparus sur le marché mais ils ne sont conçus que pour la mesure de la conductivité électrique. Le seul de ces appareils adapté à la prospection archéologique est l'EM38 (fréquence 14,6 kHz) (Geonics) (fig. 2.4), composé de deux bobines parallèles entre elles et distantes de 1 m, et qui peut être utilisé en configuration vertical coplanaire ou horizontal coplanaire. Il peut être aussi utilisé pour la mesure de la susceptibilité mais d'importants problèmes de dérive sur la réponse en phase rendent son utilisation peu pratique. Une version permettant la double mesure vient d'être commercialisée récemment.

La nomenclature des différentes orientations de bobines possibles est présentée ci-dessous (fig. 2.5) ; c'est celle qui sera utilisée par la suite.

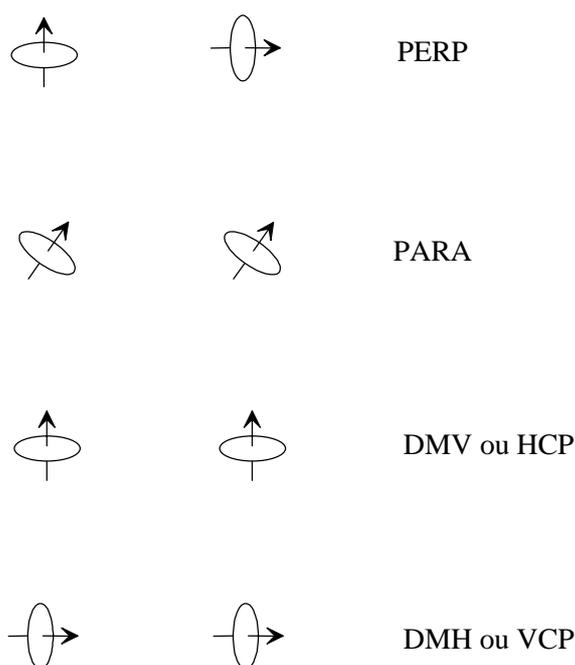


Fig. 2.6 : Nomenclature des différentes orientations de bobines pour les appareils

*Slingram*

*DMH : dipôle magnétique horizontal*

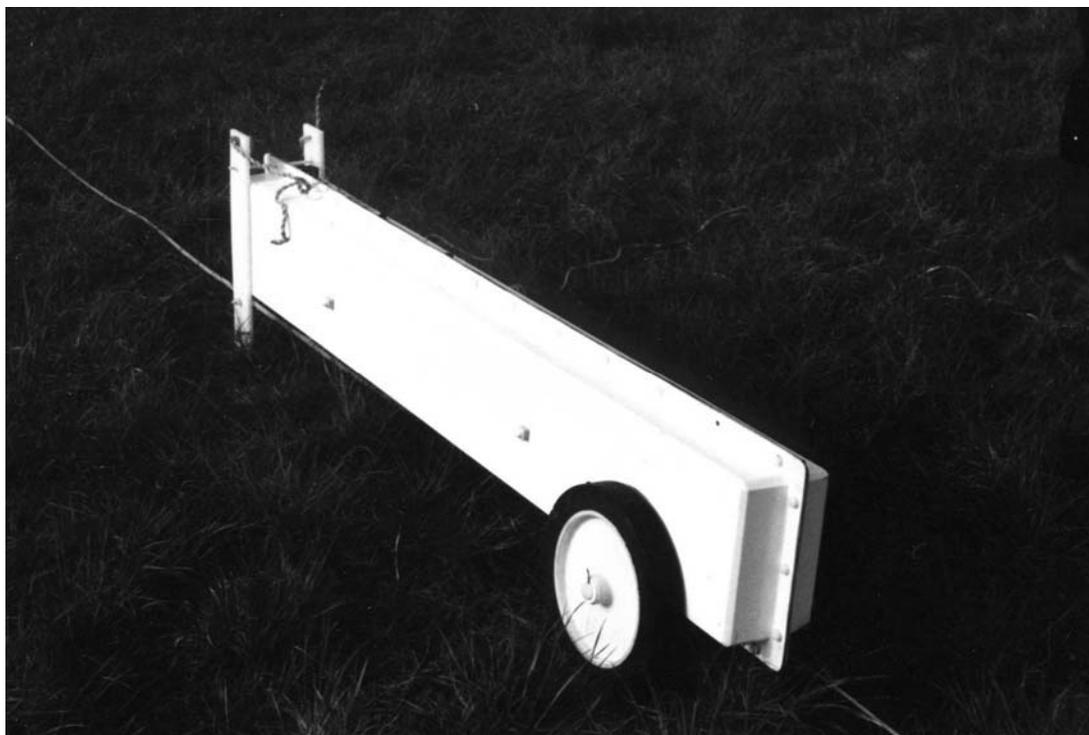
*DMV : dipôle magnétique vertical*

*VCP : vertical coplanar*

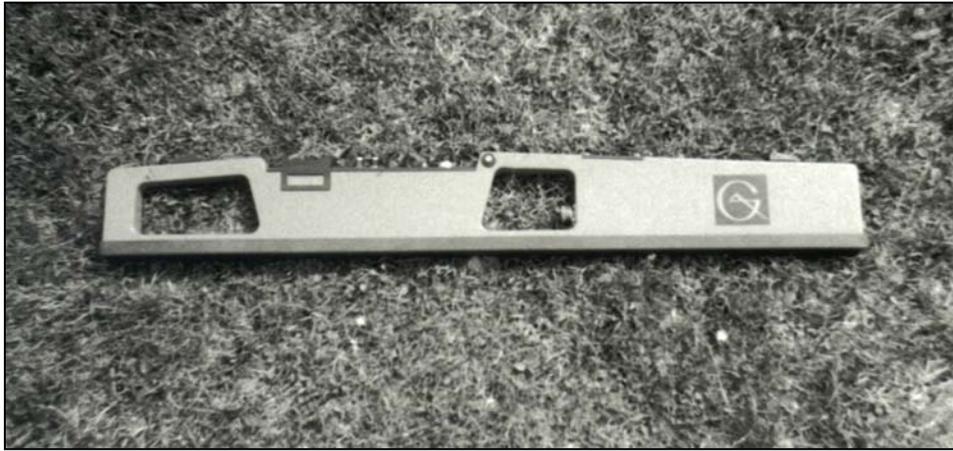
*HCP : horizontal coplanar*



*Fig. 2.3 : Le SH3, avec sa boîte d'acquisition et son câble de connexion.*



*Fig.2.4 : Le CS150 en position de mesure, la bobine réceptrice se trouve au niveau des roues.*



*Fig. 2.5 : L'EM38 de Geonics en position DMH (VCP)*

#### *1.6.2.2. Systèmes à boucles*

En domaine fréquentiel, les systèmes à boucles ont connu peu d'évolution. Le MS2, de la firme Bartington (fig. 2.6), domine le marché et est très largement utilisé en prospection large maille, notamment en Angleterre (Clark, 1990). L'utilisation de ce type d'appareil n'offre cependant guère de perspectives en raison de leur très faible profondeur d'investigation, qui ne dépasse pas les quinze premiers centimètres.



*Fig. 2.7 : Le MS2 de Bartington*

## **II. Contraintes et limites des appareils utilisés**

### **II.1. Magnétomètres**

La principale limite des appareils de prospection magnétique est leur extrême sensibilité à la présence de toute pollution métallique (fer, acier). Cette contrainte constitue un lourd handicap et restreint le nombre de terrains qui peuvent être prospectés en magnétisme : ceux-ci devront par conséquent se trouver loin de toute habitation (la prospection en milieu urbain est impossible) ; les barbelés et les clôtures électriques réduisent aussi la surface prospectable.

La variation temporelle du champ magnétique terrestre oblige, pour les magnétomètres, à revenir régulièrement à une base, ce qui diminue le rendement de prospection. L'utilisation des gradiomètres permet cependant de s'affranchir de ces problèmes de variation temporelle.

La méthode magnétique, sensible à tous les types d'aimantation, n'apporte qu'une information globale sur les propriétés magnétiques des sols. Dans un contexte archéologique, il est alors parfois difficile de déterminer le type de matériau à l'origine d'une anomalie magnétique. Les appareils magnétiques ont cependant une profondeur d'investigation bien supérieure à celle des appareils électromagnétiques, ce qui écarte le risque de ne pas détecter une structure profonde.

## II.2. Appareils électromagnétiques

### II.2.1. Réponse en phase, influence de la conductivité

Dans le cas des appareils Slingram et des systèmes à boucles, il convient de s'assurer que la conductivité électrique du terrain n'a pas d'influence sur la réponse en phase et ne fausse pas les mesures de susceptibilité magnétique apparente. Il est donc nécessaire d'évaluer l'importance de ce phénomène sur les différents appareils utilisés en prospection. Pour cela, nous calculons la réponse en phase d'un terrain homogène de susceptibilité nulle pour différentes valeurs de résistivité.

Ce calcul est réalisé pour les caractéristiques des appareils les plus utilisés et présentés précédemment.

Pour les appareils de type Slingram :

- . le SH3
- . l'EM38 (position VCP)
- . le CS60 (position VCP) (fréquence : 27,95 kHz, écartement : 0,60m)
- . le CS150

Pour les systèmes à boucles :

- . le Bartington MS2
- . un cas théorique d'une boucle de 0,50 m de rayon fonctionnant à la même fréquence que le MS2.

#### *II.2.1.1. Cas des appareils Slingram*

Les coefficients permettant d'exprimer la réponse des appareils en unités de susceptibilité magnétique apparente ont été calculés pour un terrain homogène possédant une résistivité moyenne fixée aléatoirement à 100 ohm.m. Cette hypothèse a pour effet de créer,

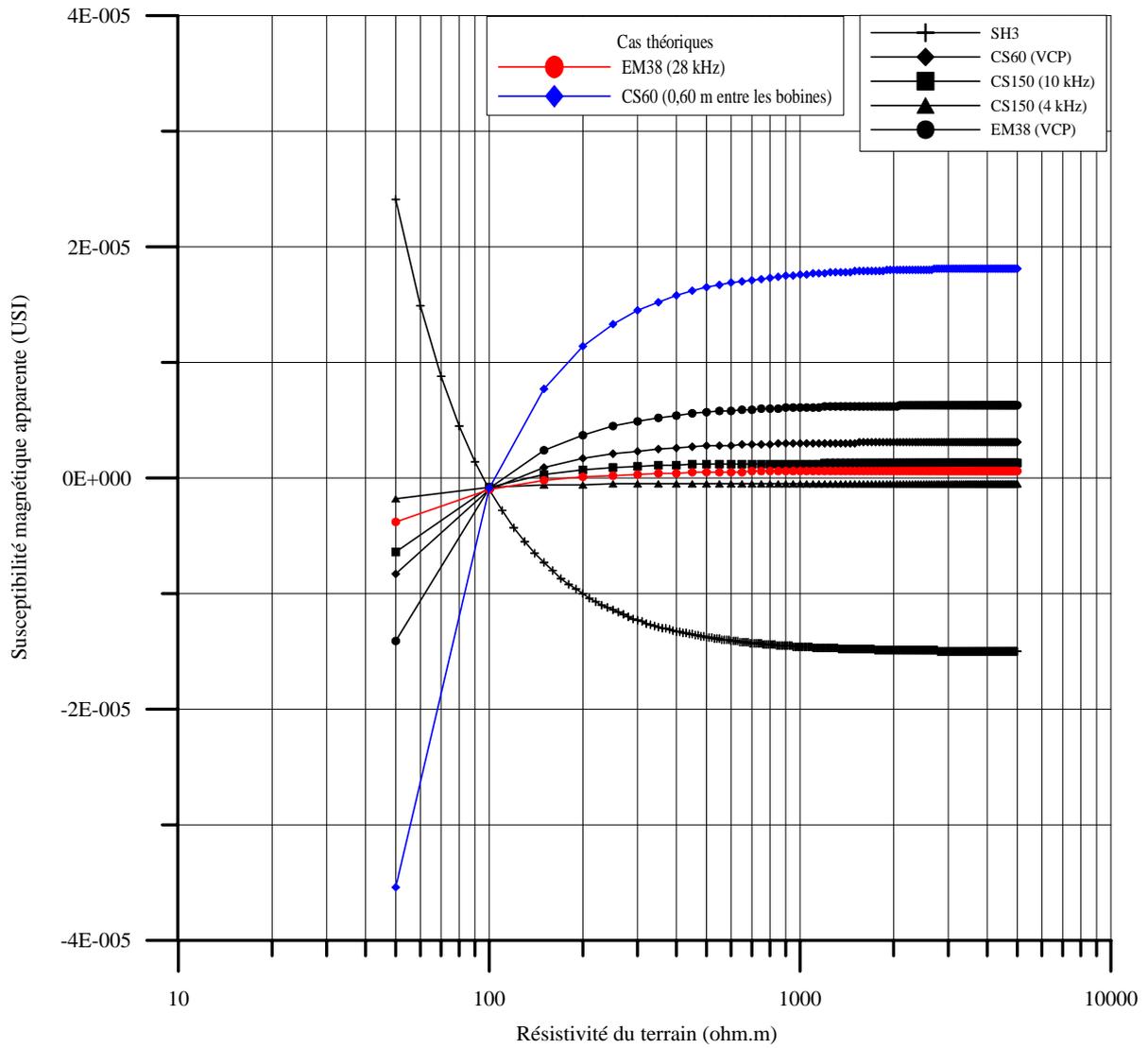
pour la valeur de 100 ohm.m, un point d'intersection commun à toutes les courbes qui, par conséquent, ne doivent être interprétées qu'en termes de variation (fig. 2.7).

Dans le cas des appareils EM38, CS60 et CS150, nous obtenons des courbes croissantes qui à partir de 200 ohm.m tendent vers une asymptote. Le SH3, au contraire, présente une courbe décroissante qui, elle aussi, tend vers une asymptote à partir de 400 ohm.m. Ce comportement est dû à l'orientation des bobines (PARA), qui correspond aussi à une variation de la susceptibilité apparente supérieure à celle des autres appareils : entre 50 et 500 ohm.m on observe une variation de la réponse en phase qui, transcrite en susceptibilité magnétique apparente, correspond à  $3,6 \cdot 10^{-5}$  USI.

Les deux appareils utilisant une configuration VCP présentent des variations légèrement supérieures à celle du CS150 (PERP), mais cette différence ne semble pas due à l'orientation des bobines. Si nous considérons le cas théorique d'un appareil fonctionnant à 14,6 kHz (EM38) pour une distance de 0,60 m (CS60), nous obtenons une courbe avec une variation inférieure à celle du CS150 à 10kHz. La distance entre bobines joue donc aussi un rôle dans le comportement des réponses des différents appareils. Aux faibles résistivités, la fréquence semble toutefois être le paramètre le plus influent : c'est en effet pour les deux fréquences du CS150 que l'on obtient les plus faibles réponses, malgré une distance de 1,50 m entre les bobines.

Il est donc préférable d'utiliser des fréquences comprises entre 1 et 10 kHz afin de minimiser l'influence de la conductivité du terrain sur la réponse en phase. Ce résultat confirme l'intérêt qu'il y a à utiliser des appareils émettant dans cette partie basse de la gamme de fréquence qui, comme nous l'avons dit, n'est pas perturbée par des émissions radio.

Les variations observées pour les différentes résistivités se situent entre  $3,6 \cdot 10^{-5}$  USI pour le SH3 et  $0,2 \cdot 10^{-5}$  USI pour le CS150 à 10 kHz. L'influence de la conductivité est donc extrêmement faible pour les appareils Slingram et n'entachera pas de façon significative les mesures de susceptibilité. Dans la gamme des appareils disponibles, le CS150 apparaît comme un excellent moyen terme entre une influence minimale de la conductivité du terrain et la distance entre bobines qui joue un rôle important concernant la profondeur d'investigation des appareils Slingram.



*Fig. 2.8 : Influence de la conductivité sur la réponse en phase pour les appareils de type Slingram*

### *II.2.1.2. Cas des systèmes à boucles*

Comme pour les appareils Slingram, la réponse en phase des systèmes à boucles a été calculée pour un terrain de résistivité 100 ohm.m. Là aussi, nous ne considérerons que les variations relatives des différentes courbes.

Le Bartington MS2 est actuellement le seul appareil sur le marché qui soit utilisé en prospection de subsurface. Dans cette étude, nous présentons aussi le cas d'une boucle de 0,50 m de rayon pour la même fréquence que le Bartington, afin de pouvoir évaluer l'influence de la conductivité en fonction de la dimension de la boucle. Dans tous les cas, les valeurs des réponses dues à la conductivité obtenues en phase pour tous les systèmes à boucles sont au moins dix fois supérieures à celles des appareils Slingram. La hauteur de l'appareil par rapport au sol peut en outre varier de quelques centimètres suivant le type de terrain prospecté (fig. 2.8a); ces faibles variations peuvent avoir des conséquences importantes sur l'influence de la conductivité sur la réponse en phase. Pour un terrain conducteur (65 ohm.m), la réponse varie de  $14 \cdot 10^{-5}$  USI entre une hauteur d'appareil de 1 cm et une de 5 cm. Pour un terrain très résistant (1000 ohm.m), cette variation atteindra  $41 \cdot 10^{-5}$  USI. Pour une même hauteur d'appareil, les variations sont également très importantes entre un terrain conducteur et un terrain résistant : pour  $h=1$  cm, on observe une variation de la réponse en phase correspondant à  $24 \cdot 10^{-5}$  USI entre 50 et 500 ohm.m. La pente des courbes augmente avec la hauteur de l'appareil et cette même variation atteint une valeur de  $99 \cdot 10^{-5}$  USI pour  $h=5$  cm. L'influence de la conductivité sur la réponse en phase peut par conséquent aisément "masquer" la réponse magnétique. Les mêmes essais à différentes hauteurs ont été réalisés pour les appareils Slingram : les courbes obtenues se superposent et montrent que l'influence de la conductivité est la même quelle que soit la hauteur de l'appareil (ceci toujours pour une gamme située entre 1 cm et 5 cm), soit de quelques unités en  $10^{-5}$  USI.

Dans le cas d'une boucle de 0,50 m, les courbes obtenues sont légèrement supérieures à celles du Bartington et leur écart se resserre lorsque la hauteur de l'appareil augmente. De telles boucles seraient donc encore moins bien adaptées à la prospection de subsurface.

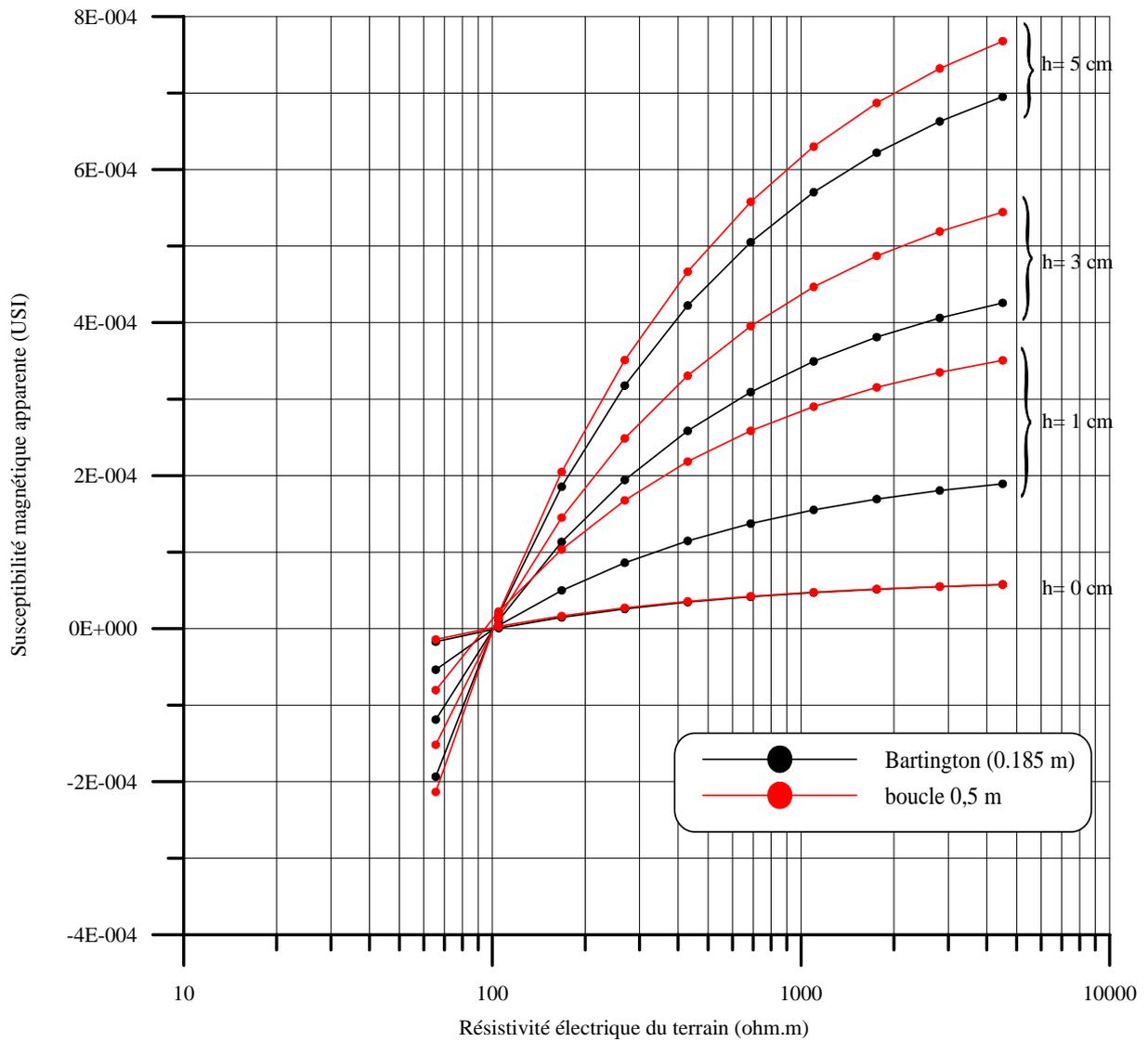
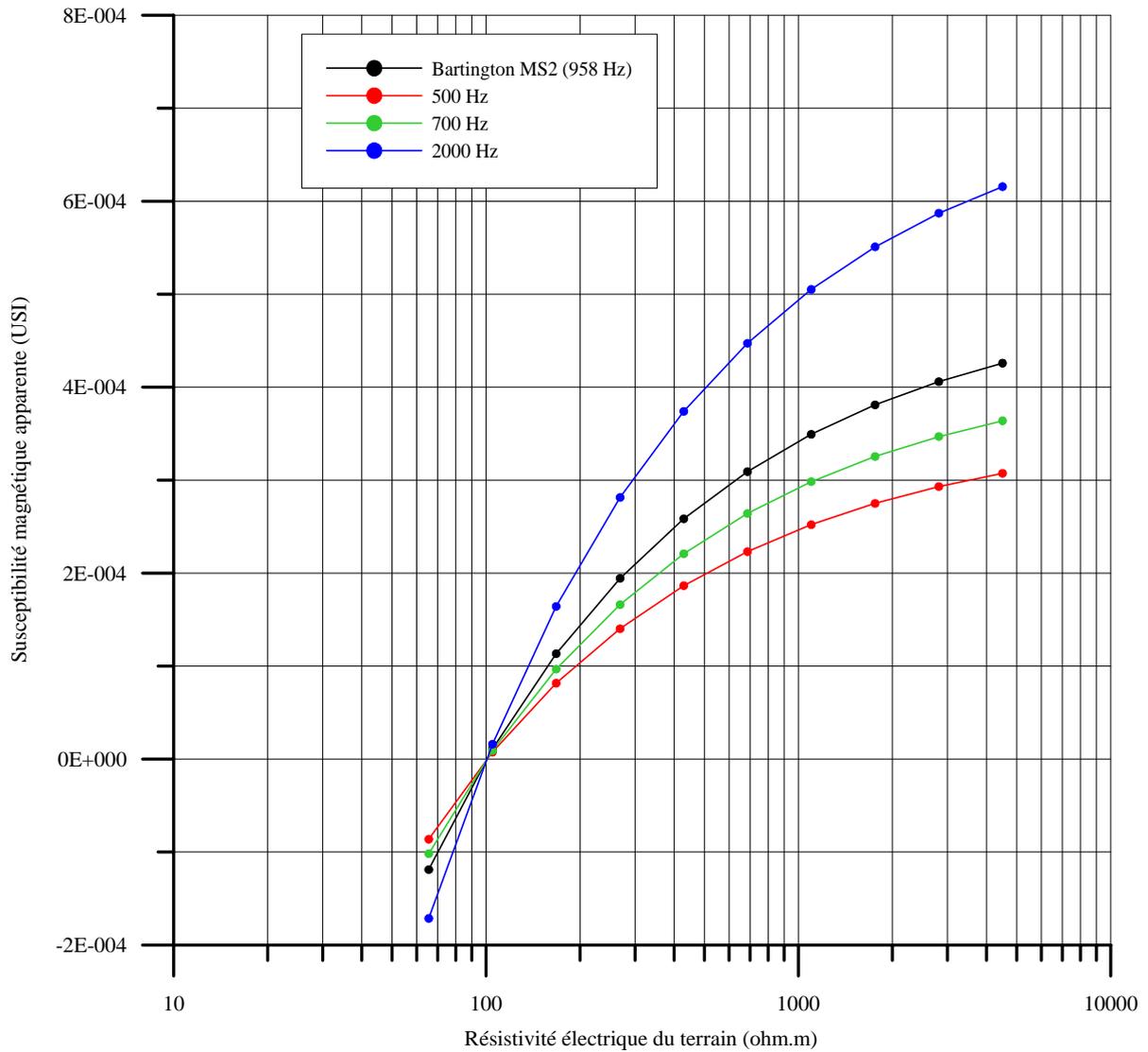


Fig. 2.9a : Influence de la conductivité sur la réponse en phase pour les systèmes à boucles

Dans le cas des systèmes à boucles, il y a peu de paramètres sur lesquels il soit possible d'agir pour améliorer les performances. La fréquence peut être un paramètre intéressant à étudier car elle peut, comme dans le cas des appareils Slingram, avoir une influence non négligeable sur la réponse en phase de l'appareil. Une série de simulations a donc été réalisée pour des modèles reprenant les caractéristiques du Bartington à des fréquences différentes (Fig. 2.9b) : l'influence de la conductivité sur la réponse en phase augmente avec la fréquence et l'utilisation de fréquences supérieure à 1 kHz est à exclure car la pente des courbes est nettement plus forte que pour la gamme comprise entre 500 et 1000 Hz. Dans cet intervalle, les variations entre les différentes courbes sont faibles pour des terrains conducteurs ( $\sim 10^{-4}$  USI entre 500 et 958 Hz à 65 ohm.m) ; l'écart grandit pour des terrains plus résistants et atteint  $12 \cdot 10^{-5}$  USI pour 5000 ohm.m. L'utilisation de fréquences inférieures à 958 Hz permettrait donc de diminuer quelque peu l'influence de la conductivité du terrain mais cette dernière demeure néanmoins suffisamment élevée pour entraîner d'importantes erreurs sur les mesures de susceptibilité magnétique apparente.



*Fig. 2.9b : Influence du choix de la fréquence sur la réponse en phase pour les systèmes à boucle*

## II.2.2. Profondeur d'investigation

Le choix d'utiliser comme source de champ primaire des bobines ou des boucles a permis la conception d'appareils maniables et bien adaptés aux impératifs du terrain. Mais le fait que le champ primaire ne soit pas uniforme entraîne une profondeur d'investigation faible par rapport aux méthodes à sources lointaines.

### II.2.2.1. Appareils Slingram

La manière la plus simple d'améliorer la profondeur d'investigation des appareils Slingram est d'augmenter l'écartement entre les bobines. Historiquement, il s'agit d'ailleurs de la première modification apportée à ces appareils avec la construction du SH3 (1,50 m d'écartement) qui a succédé à l'EM15 (0,83 m d'écartement). Cette évolution a permis d'obtenir une profondeur d'investigation de 70 cm environ contre 40 cm pour l'EM15 (Tabbagh, 1982). Outre l'inconvénient d'un plus grand encombrement, cette méthode a toutefois ses limites : l'écartement des bobines entraîne une perte en résolution latérale ; un appareil muni de bobines trop écartées serait alors inadapté à la prospection des deux premiers mètres.

Une étude théorique (Tabbagh, 1986a) a montré que l'orientation des bobines avait une grande influence sur le comportement de la réponse en phase des appareils Slingram. Ce travail a permis de mettre en évidence, pour cinq orientations différentes, l'amplitude du signal, la symétrie des courbes, l'influence des anomalies superficielles mais surtout la profondeur d'investigation qu'il est possible d'atteindre pour chaque cas. Le choix de l'orientation PARA pour l'EM15 et le SH3 avait été essentiellement dicté par le fait que dans cette configuration, le couplage est nul entre les bobines émettrice et réceptrice. Cette étude a également montré que la position PERP constituait une configuration optimale en termes d'amplitude de signal et de profondeur d'investigation. La réponse en phase a, en outre, l'avantage de ne pas changer de signe avec la profondeur de la couche, contrairement à ce que l'on observe pour l'orientation PARA ; son unique inconvénient est de donner une courbe en cloche dissymétrique qui peut donc entraîner une légère erreur sur la position exacte des structures détectées. La position VCP est la deuxième configuration la plus favorable : malgré une amplitude de signal et une profondeur d'investigation moindre, elle a l'avantage de donner une courbe parfaitement symétrique.

Cette étude est reprise ici en utilisant les paramètres des appareils déjà présentés afin de déterminer lequel d'entre eux possède une configuration optimale. Pour cela, nous avons utilisé deux modèles : le premier est constitué d'une fine couche magnétique résistante dans un milieu conducteur peu magnétique (Fig. 2.10a) et le deuxième d'une fine couche magnétique conductrice dans un milieu résistant peu magnétique (Fig. 2.10b). Comme dans l'étude de l'influence de la conductivité sur la réponse en phase, le calcul des coefficients permettant d'exprimer la réponse en phase en termes de susceptibilité magnétique apparente nécessite de fixer une résistivité moyenne du terrain. Pour l'étude qui suit, nous avons pris comme valeur moyenne la résistivité du milieu, sans tenir compte de la couche intermédiaire, soit 20 ohm.m pour le premier modèle et 200 ohm.m pour le deuxième. Il est toutefois important de noter que les résultats de ces modèles peuvent être différents suivant la résistivité moyenne choisie; cette différence porte essentiellement sur les amplitudes, mais l'allure des courbes en fonction de  $e_1$  est la même.

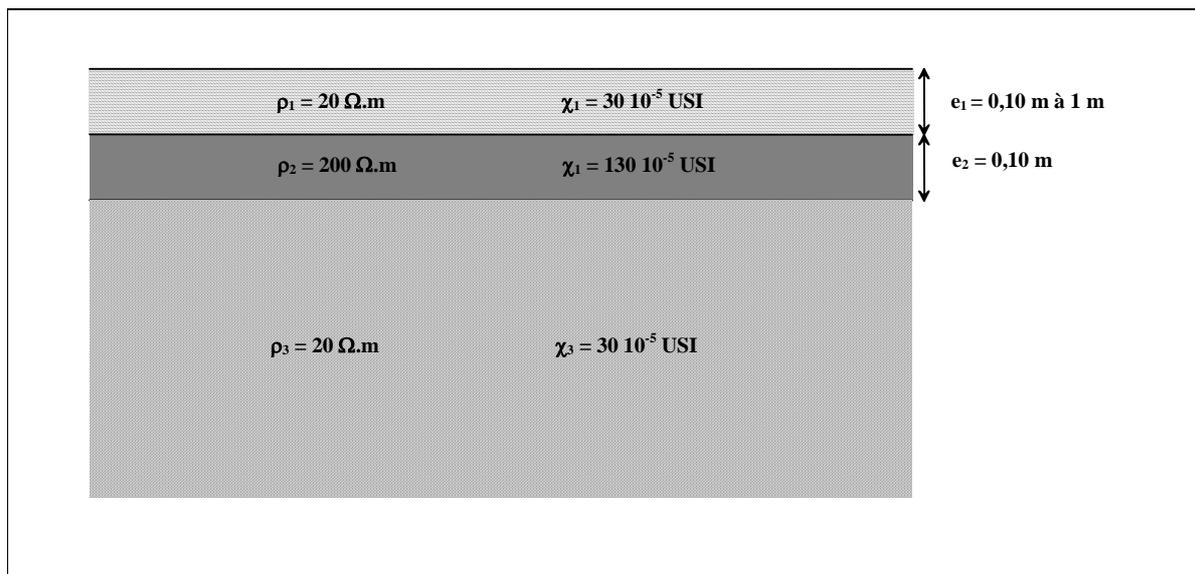
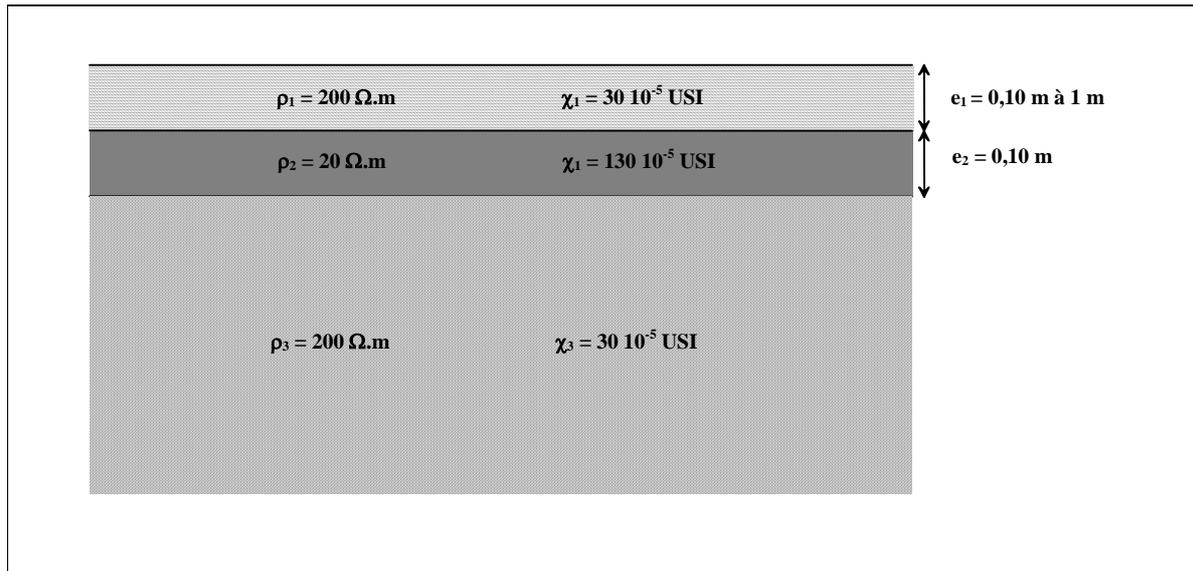


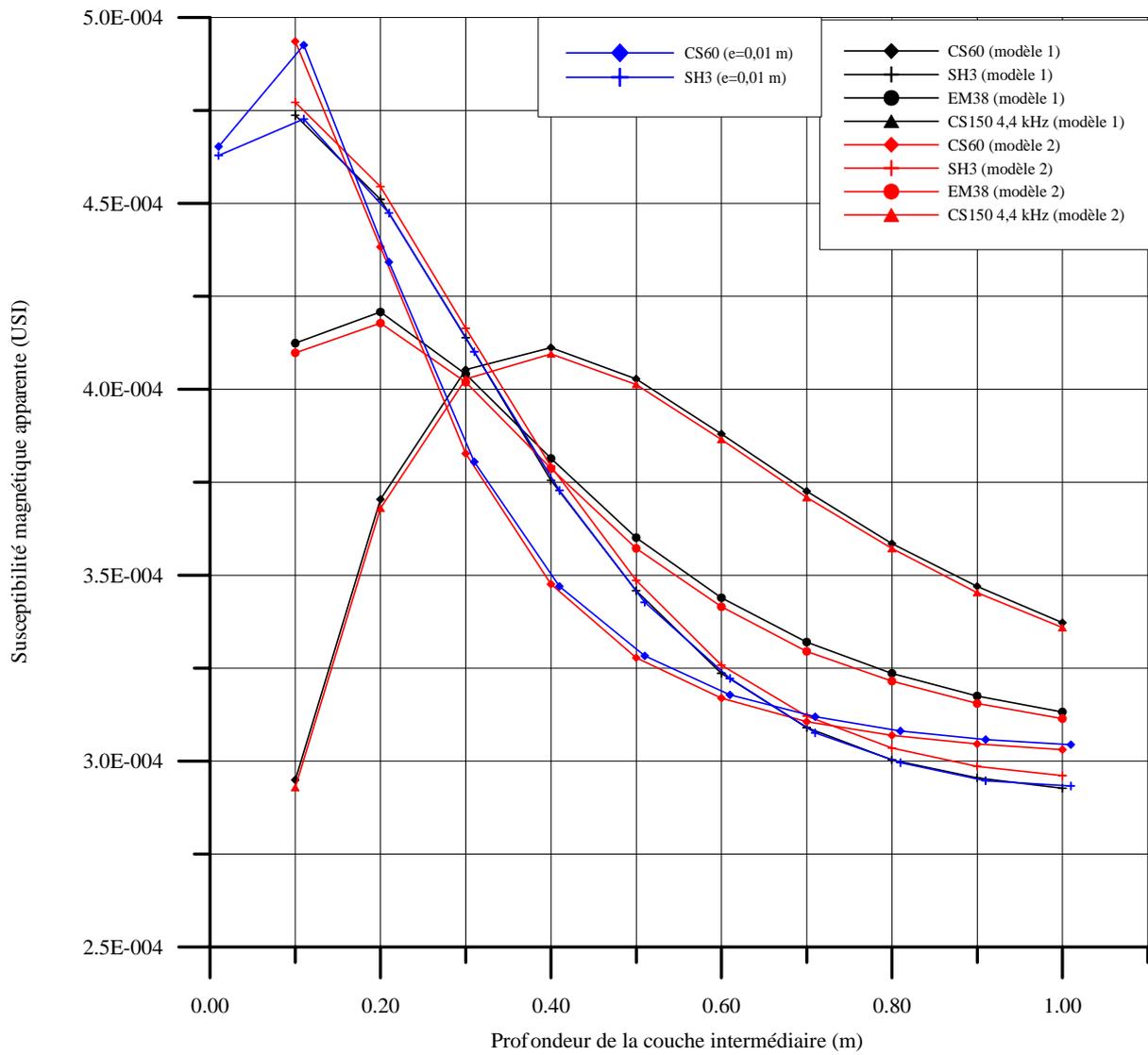
Fig. 2.10a : Modèle 1 : Cas d'une couche magnétique résistante dans un milieu conducteur



*Fig. 2.10b : Modèle 2 : Cas d'une couche magnétique conductrice dans un milieu résistant*

Pour chaque modèle, on augmente progressivement l'épaisseur de la première couche, ce qui équivaut à augmenter la profondeur du toit de la fine couche magnétique. Les réponses des différents appareils ont toutes la même allure, à savoir une courbe "en cloche" plus ou moins marquée. Ce comportement particulier semble donc être général pour les appareils Slingram, quelle que soit la configuration choisie. Les courbes obtenues peuvent se diviser en deux groupes (Fig. 2.11) : le premier est formé des réponses du CS60 et du SH3 et le deuxième du CS150 (4,4 kHz et 10 kHz) et de l'EM38. Les résultats obtenus pour les deux modèles sont très proches : la résistivité du terrain a donc peu d'effet sur les performances des appareils Slingram concernant la profondeur d'investigation.

Les courbes du CS60 et du SH3 se caractérisent par un maximum correspondant à une faible profondeur de la couche intermédiaire ( $\sim 11 \text{ cm}$ ), un signal particulièrement élevé mais qui décroît ensuite très rapidement pour atteindre un palier proche de  $30 \cdot 10^{-5} \text{ USI}$  à partir de 0,8 m. Les maximums des courbes de l'EM38 et du CS150 sont obtenus pour une profondeur de la couche intermédiaire de 0,20 m et 0,40 m respectivement. Le signal est plus faible pour les premiers centimètres mais la décroissance de la courbe après le maximum est plus lente.



*Fig. 2.11 : Variation de la réponse en phase en fonction de la profondeur de la couche intermédiaire*

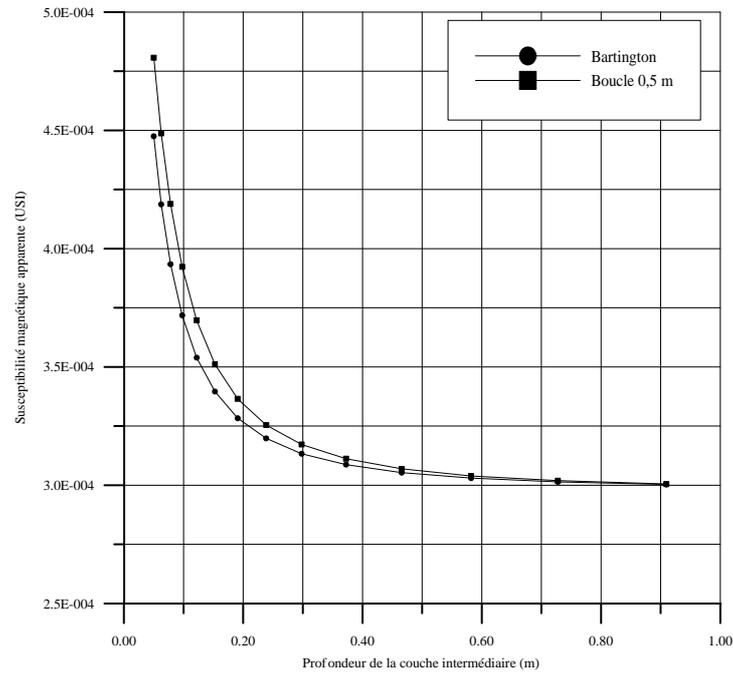
La réponse des appareils Slingram, caractérisée par une variation qui présente un maximum, est particulièrement intéressante : la réponse due aux effets très superficiels est plus faible que celle due aux effets plus profonds correspondant au maximum des courbes pour les différents appareils. Si le maximum de la courbe de réponse du CS150 est la moins forte en amplitude, il est aussi situé à une profondeur supérieure à celle des autres appareils et se prolonge ensuite par un signal qui décroît beaucoup plus lentement. Le CS150 apparaît donc comme l'appareil le plus performant en termes de profondeur d'investigation. Ce comportement intéressant de la réponse en phase semble être caractéristique de la configuration PERP des bobines : la fréquence a en effet peu d'influence sur le comportement des appareils puisque les courbes 4,4 kHz et 10 kHz pour le CS150 sont quasiment confondues. La différence observée entre le CS60 et l'EM38 (VCP) est essentiellement due à la distance entre les bobines : lorsque cette distance est faible, le maximum de la courbe correspond à une faible profondeur avec une amplitude très élevée mais qui décroît rapidement. L'orientation PARA apparaît comme mal adaptée car malgré une distance entre les bobines de 1,50 m, la réponse du SH3 est similaire à celle du CS60 (VCP).

#### *II.2.2.2. Systèmes à boucles*

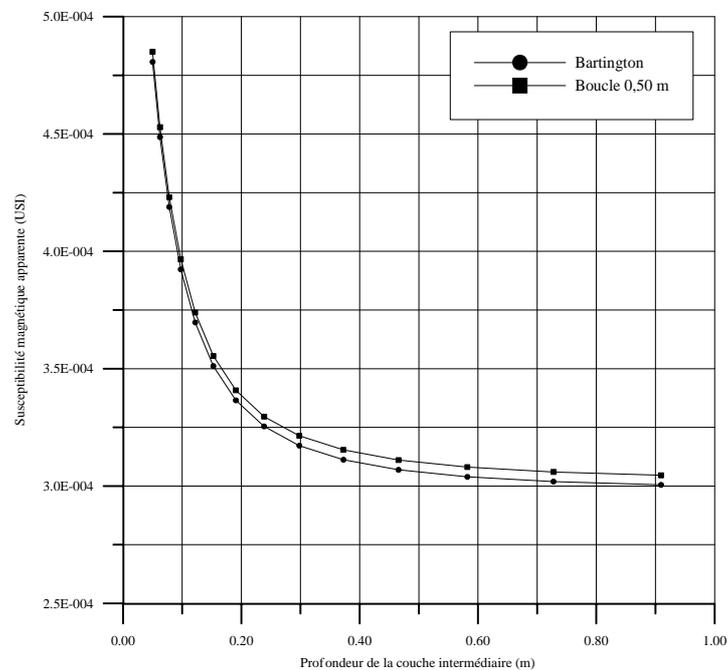
Les deux modèles présentés dans la partie précédente sont utilisés pour étudier la profondeur d'investigation du Bartington ainsi que le cas théorique d'une boucle de 0,5 m de rayon. Toutes les courbes obtenues sont monotones décroissantes : cette décroissance est particulièrement rapide sur les 20 premiers centimètres et atteint ensuite un palier situé autour de  $30 \cdot 10^{-5}$  USI (Fig. 2.12a). Dans le cas d'une boucle de 0,5 m de rayon (Fig. 2.12b), la réponse est légèrement plus forte mais décroît tout aussi rapidement que celle du Bartington pour enfin se confondre avec cette dernière. Les courbes obtenues dans le cas d'une couche intermédiaire résistante ont une amplitude légèrement inférieure par rapport au cas de la couche intermédiaire conductrice ; la résistivité n'a ici aussi qu'une faible influence sur la profondeur d'investigation. Il est toutefois important de noter que l'étude antérieurement publiée (Benech et Marmet, 1999) prenait, pour le calcul des coefficients, une résistivité moyenne de 100 ohm.m. Dans le cas des systèmes à boucles, la différence entre les deux modèles est alors plus importante.

Les systèmes à boucles sont donc particulièrement sensibles aux effets de surface et par conséquent peu adaptés à une reconnaissance du sous-sol au-delà d'une dizaine de

centimètres, profondeur où la réponse d'une couche fine est déjà réduite de moitié par rapport à sa valeur pour 5 cm.



*Fig. 2.12a : Variation de la réponse en phase en fonction de la profondeur d'une fine couche magnétique résistante*



*Fig. 2.12b : Variation de la réponse en phase en fonction de la profondeur d'une fine couche magnétique conductrice*

### II.2.3. Problèmes de dérive et réglage du zéro

L'utilisation d'appareils électromagnétiques nécessite, en général, la détermination d'une référence. Du fait de la faible profondeur d'investigation, le réglage du zéro de la réponse en phase est relativement simple : il suffit le plus souvent d'élever l'appareil à une hauteur où la susceptibilité du terrain n'a plus d'effet sur la mesure. Cette mesure du zéro doit être répétée régulièrement au cours de la prospection car ces appareils subissent au cours du temps une dérive mécanique, d'origine thermique essentiellement.

Le problème est plus complexe pour les mesures de la conductivité électrique apparente sur la composante en quadrature. Le réglage du zéro nécessiterait théoriquement d'élever l'appareil à plusieurs mètres au-dessus du sol, ce qui est irréalisable en prospection. Plusieurs solutions sont alors possibles : dans le cas du SH3, le zéro de la composante en quadrature est réalisé à partir de deux mesures à des hauteurs différentes ; le calcul du zéro est alors fait à partir de la variation observée (Parchas, 1978). Cette méthode nécessite l'implantation d'une base à laquelle il est nécessaire de revenir pour chaque mesure de zéro. C'est donc une méthode particulièrement contraignante dans le cas d'une prospection large maille sur de grandes surfaces. Dans le cas du CS150, la configuration des bobines permet d'utiliser une autre solution : dans le cas d'une configuration PERP des bobines, la réponse du terrain tabulaire est nulle lorsque les axes des bobines sont dans un plan parallèle à la surface du sol. En prospection, il suffit donc de coucher l'appareil sur le sol pour réaliser une mesure de zéro.

Ces mesures régulières de zéro permettent de tenir compte des dérives de l'appareil au cours de la prospection. La chaleur est la principale source des déformations mécaniques sur l'appareil ; les bobines risquent alors de ne plus être dans le même plan. Une faible déformation peut entraîner une variation non négligeable de la réponse en phase. Afin de palier ce problème, il est nécessaire que les appareils Slingram soient constitués d'une double structure mécanique, l'une étant la structure supportant les bobines et l'autre protégeant cette structure des déformations tant mécaniques que thermiques. Dans le cas du CS150, les bobines sont montées sur une structure en contreplaqué marin et polystyrène posée sur deux axes reliés à la coque.

---

## **Chapitre 3 : Comparaison de prospections Magnétique et électromagnétique par filtrage linéaire des données : principe et analyse de modèles synthétiques**

---

### **I. Introduction**

Plusieurs travaux ont déjà été réalisés sur la comparaison de données de prospections magnétiques et électromagnétiques (Howell, 1968 ; Tite et Mullins, 1969 ; Tabbagh, 1971 ; Tabbagh, 1984, Tabbagh et al., 1988, Desvignes et Tabbagh, 1995) et ont clairement montré les différences dans les résultats obtenus avec les deux méthodes et par conséquent leur complémentarité.

La méthode électromagnétique restitue mieux la géométrie de la structure détectée ; elle nous apporte une information quantitative directe sur la susceptibilité magnétique apparente mais n'est pas sensible à tous les types d'aimantation.

Par sa meilleure profondeur d'investigation et sa sensibilité à tout type d'aimantation, sans qu'il soit toutefois possible de les dissocier, la méthode magnétique apporte une information plus globale mais qui ne peut être interprétée qu'en termes de variation. Aussi, afin de mieux appréhender l'information acquise par ces deux méthodes et de mieux exploiter leur complémentarité, il est intéressant de déduire la réponse magnétique due à l'aimantation induite, des données acquises en projection électromagnétique.

Ce type de calcul a déjà été réalisé en situation 1D pour des mesures en forage (Desvignes et al., 1992). Nous nous proposons ici de traiter le cas 2D, correspondant à une cartographie en (x,y) à la surface du sol. L'intérêt premier de cette étude est de dissocier par filtrage linéaire l'effet de l'aimantation induite de celui de l'aimantation rémanente ou visqueuse. Les contraintes et les limites de chacune de ces méthodes peuvent cependant entraîner des différences qui ne sont pas dues au type d'aimantation. Cette étude théorique a pour but d'évaluer ces différences afin de mieux utiliser l'application du filtrage à des données de terrain.

## II. Calcul de la réponse magnétique due à l'aimantation induite à partir de données électromagnétiques par filtrage linéaire

### II.1. Principe théorique

Dans le domaine magnétique, si l'on néglige le champ démagnétisant et si l'on se limite à l'aimantation induite, la réponse magnétique peut s'exprimer par le produit de convolution à deux dimensions suivant :

$$\Delta T(x, y) = \chi(x, y, z_0) \otimes R_m(x, y, z_0) \quad (1)$$

avec :  $\Delta T(x, y)$  : variation latérale du champ magnétique terrestre

$\chi(x, y, z_0)$  : distribution volumique de la susceptibilité

$R_m(x, y, z_0)$  : réponse magnétique impulsionnelle (réponse électromagnétique d'un dipôle ou d'une ligne verticale de dipôles)

Cette approximation est justifiée pour l'étude des structures de sub-surface, qu'elles soient d'origine pédologique ou anthropique : le champ démagnétisant ne devient non négligeable que dans certains phénomènes géologiques où interviennent des roches ( basiques ou ultrabasiques) très magnétiques (Telford et al., 1990).

De même, dans le domaine EM, la susceptibilité magnétique apparente peut être approchée par le produit de convolution suivant parce que pour les mêmes raisons qu'en magnétisme le champ démagnétisant est négligeable et qu'il a été montré que les effets croisés l'étaient aussi (Tabbagh, 1985). On a donc :

$$\chi_a(x, y) = \chi(x, y, z_0) \otimes R_{em}(x, y, z_0) \quad (2)$$

avec :  $R_{em}(x, y, z_0)$  : réponse électromagnétique impulsionnelle

$\chi(x, y, z_0)$  représente la distribution de la susceptibilité magnétique dans le sous-sol considéré ; elle est identique pour les équations (1) et (2).

Dans le domaine spectral, les produits de convolution des équations (1) et (2) deviennent des produits directs ; on a alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \hat{T}(u, v) = \hat{\chi}(u, v, z_0) \cdot \hat{R}_m(u, v, z_0) \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{\chi}_a(u, v) = \hat{\chi}(u, v, z_0) \cdot \hat{R}_{em}(u, v, z_0) \end{array} \right. \quad (4)$$

( le signe ^ symbolisant la transformée de Fourier des fonctions précédemment définies)

La réponse impulsionnelle magnétique est simple et on connaît l'expression analytique de sa transformée de Fourier :

$$\hat{R}_m(u, v, z_0) = 4\pi^2 \frac{e^{-2\pi z_0 \sqrt{u^2 + v^2}}}{\sqrt{u^2 + v^2}} \left( i\omega \cos D \cos I + iv \cos I + \sqrt{u^2 + v^2} \sin I \right)^2 \quad (5)$$

La réponse impulsionnelle en électromagnétisme a une expression complexe où interviennent les paramètres liés à l'appareil et les propriétés du sol. On doit à partir de l'émettrice et de son orientation calculer le champ créé sur le dipôle, ce qui fait intervenir les différentes transformées de Hankel déjà publiées (Tabbagh, 1985, appendix). Les réponses de chacune des composantes du dipôle doivent ensuite être calculées au point où se trouve la réceptrice et projeté sur l'axe de celle-ci, ce qui nécessite à nouveau des expressions en transformée de Hankel. Ce calcul étant fait en chacun des points du maillage, on en prend ensuite la transformée de Fourier numérique à deux dimensions.

En combinant les équations (3) et (4), nous obtenons une relation linéaire entre la transformée de Fourier de la réponse magnétique et celle de la susceptibilité magnétique apparente mesurée en prospection électromagnétique :

$$\Delta \hat{T}(u, v) = \hat{\chi}_a(u, v) \cdot \frac{\hat{R}_m(u, v, z_0)}{\hat{R}_{em}(u, v, z_0)} \quad (6)$$

La fonction filtre permettant de passer de l'anomalie électromagnétique à l'anomalie magnétique résultant de l'aimantation induite est alors définie par le rapport  $\frac{\hat{R}_m(u, v, z_0)}{\hat{R}_{em}(u, v, z_0)}$ .

## II.2. Test sur des données synthétiques

### II.2.1. Introduction

Contrairement au cas 1D, la fonction filtre dépend d'un paramètre variable : la profondeur du dipôle. Deux solutions peuvent *a priori* être envisagées ; on peut considérer un dipôle correspondant à la profondeur moyenne de la structure source des anomalies, on peut aussi utiliser une ligne verticale de dipôles s'étendant sur toute l'épaisseur de cette structure. La différence de profondeur d'investigation entre les deux méthodes doit aussi être prise en compte dans le choix de la profondeur du ou des dipôles, la méthode magnétique possédant en effet une profondeur d'investigation supérieure à celle de la méthode électromagnétique. Il est alors possible que certaines structures profondes entièrement détectées en magnétisme, ne le

soient que partiellement en électromagnétisme, ce qui entraînera fatalement une différence entre les données magnétiques et les données électromagnétiques filtrées. Dans un premier temps, on va comparer la réponse obtenue avec une série de dipôles verticaux rendant compte de l'épaisseur de la structure avec celle obtenue pour un seul dipôle positionné à une profondeur moyenne.

Dans un cas de terrain, la profondeur des structures détectées en électromagnétisme ou en magnétisme n'est connue que de façon approximative, particulièrement dans le cas de structures lenticulaires de faible épaisseur. Il est donc nécessaire d'évaluer les conséquences d'une mauvaise estimation de la profondeur du dipôle sur le filtrage des données électromagnétiques, ce qui ne peut se faire que par un processus d'approximations successives.

### II.2.2. Etude d'une structure en "L"

Le premier modèle étudié est une structure en forme de "L" dont les paramètres sont présentés sur la figure 3.1. L'intérêt de cette géométrie, tant pour les études théoriques que pour les modèles de terrain, est de présenter deux orientations différentes : les mesures magnétiques n'étant généralement pas isotropes (inclinaison du champ et orientation de la structure) et les données électromagnétiques ne l'étant jamais (rôle de la direction émettrice-réceptrice de l'appareil) pour une structure allongée. On associe à cette structure une susceptibilité de  $130 \cdot 10^{-5}$  USI dans un terrain homogène de faible susceptibilité ( $30 \cdot 10^{-5}$  USI) et conducteur (30 ohm.m).

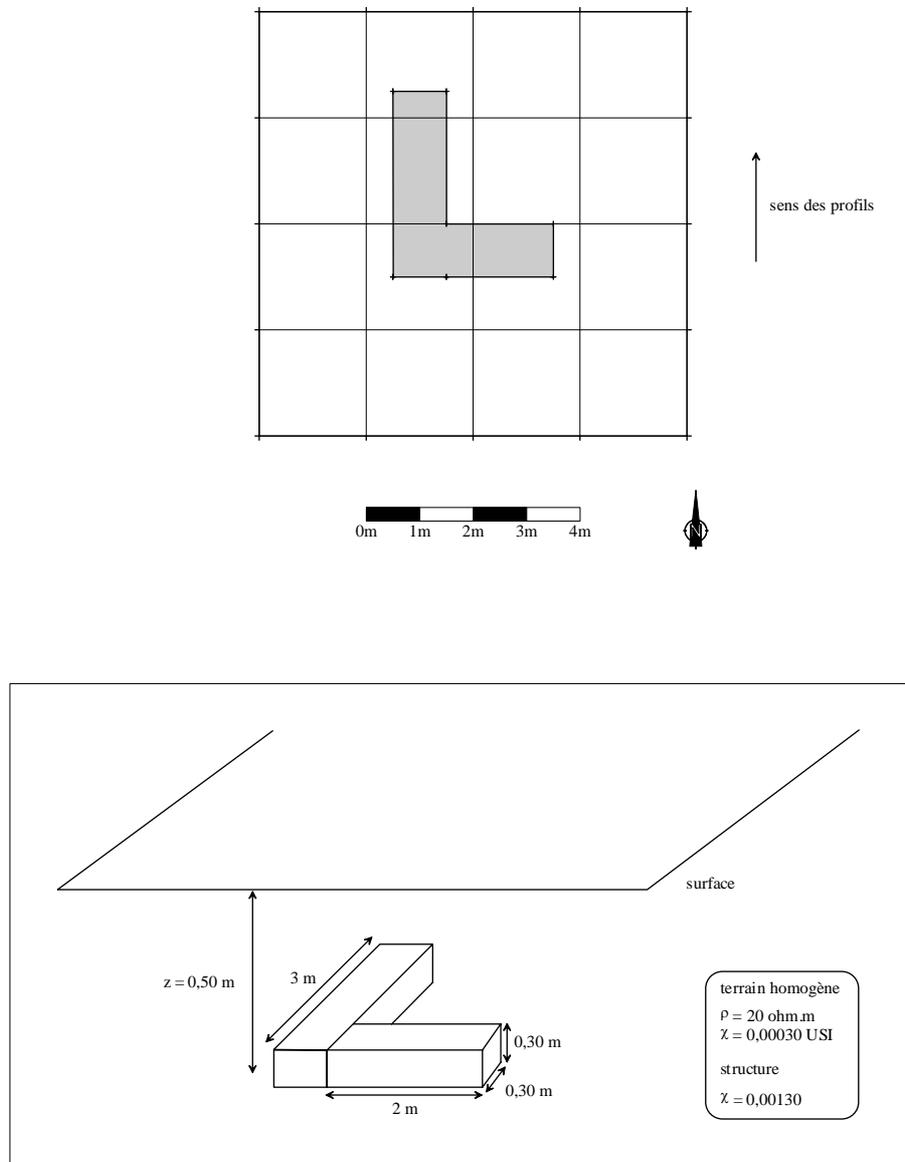


Fig. 3.1 : Position et caractéristiques de la structure en "L"

Les figures 3.2a et 3.2b présentent les résultats obtenus respectivement pour le CS150 (4,4 kHz) et pour un magnétomètre fonctionnant en champ total, avec une sonde à 30 cm au-dessus du sol. La première observation, valable quelle que soit les appareils EM ou M utilisés, est que la géométrie de la structure est mieux restituée en EM qu'en M. Dans le cas du CS150, le maximum de l'anomalie obtenue pour la branche perpendiculaire aux profils de mesure ainsi qu'à l'appareil est légèrement décalé. L'orientation PERP des bobines donne en effet une réponse légèrement dissymétrique (Tabbagh, 1986a).

Les données EM sont filtrées à partir d'une fonction filtrée calculée pour un seul dipôle situé à une profondeur moyenne de 0,50 m (fig. 3.2c) puis pour trois dipôles situés entre 0,45 m et 0,65 m et espacés de 0,10 m (fig. 3.2d) ; cette dernière rend donc compte de façon complète de l'épaisseur de la structure.

Les anomalies obtenues à partir des données filtrées ont une forme très proche de celle obtenue pour les données magnétiques et leur localisation est identique par rapport à la position de la structure en "L" matérialisée par des croix blanches sur les cartes. Numériquement (tableau 3.1), les données obtenues à partir de la fonction de transfert calculée avec trois dipôles ne présentent qu'un faible écart avec les données magnétiques alors que dans le cas d'un seul dipôle, le minimum et le maximum sont légèrement surestimés et l'écart-type est un peu plus important ( $\sim 0,1$ nT).

"L" : CS150 (4,4 kHz)	minimum (nT)	maximum (nT)	somme (nT)	moyenne (nT)	écart-type
données M	-1,18	3,32	231,34	$8,89 \cdot 10^{-2}$	0,69
données EM filtrées : 1 dipôle	-1,11	3,59	231,34	$8,89 \cdot 10^{-2}$	0,75
données EM filtrées : 3 dipôles	-1,17	3,31	231,34	$8,89 \cdot 10^{-2}$	0,69

*Tableau 3.1 : Caractéristiques des données obtenues sur la structure en "L" en magnétisme et en électromagnétisme pour le CS150 (4.4 kHz) après filtrage.*

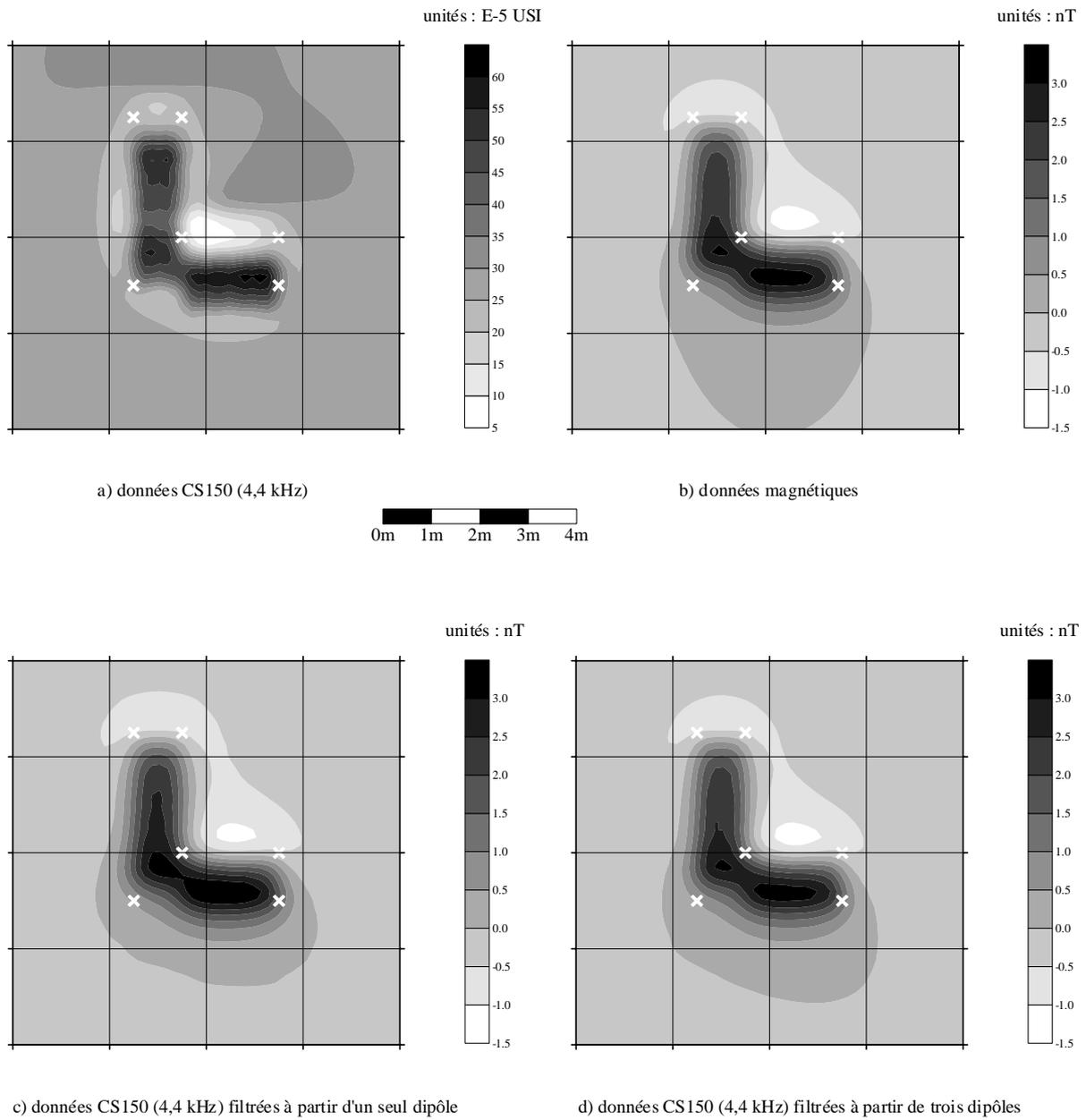
La même modélisation est réalisée pour le SH3 (configuration PARA) (fig. 3.3a). La configuration des bobines donne, elle aussi, une réponse dissymétrique et l'anomalie est décalée par rapport à la position de la structure mais rend toutefois mieux compte de sa

géométrie que la carte magnétique. Les fonctions de transfert calculées avec les mêmes dipôles que pour la configuration CS150 sont appliquées aux données SH3 (fig. 3.3c et 3.3d). Dans ce cas aussi, le filtrage restitue correctement la forme de l'anomalie magnétique et sa position dans la carte de prospection. Numériquement, les données obtenues par filtrage restent très proches des données magnétiques (tableau 3.2) mais, dans le cas présent, le résultat obtenu avec un seul dipôle constitue une meilleure approximation que dans le cas de trois dipôles.

"L" : SH3	minimum (nT)	maximum (nT)	somme (nT)	moyenne (nT)	écart-type
données M	-1,18	3,32	231,34	$8,89 \cdot 10^{-2}$	0,69
données EM filtrées : 1 dipôle	-1,11	3,43	231,34	$8,89 \cdot 10^{-2}$	0,76
données EM filtrées : 3 dipôles	-1,04	3,13	231,34	$8,89 \cdot 10^{-2}$	0,670

*Tableau 3.2 : Caractéristiques des données obtenues sur la structure en "L" en magnétisme et en électromagnétisme pour le SH3 après filtrage.*

Ce premier essai montre que dans le cas d'une structure à faible profondeur et peu épaisse, la fonction de transfert calculée pour un seul dipôle situé à une profondeur moyenne donne un résultat peu différent de celui obtenu pour trois dipôles. Le CS150 et le SH3 donnent des réponses différentes dues à la configuration de leurs bobines ; les anomalies calculées à partir des données filtrées ont une forme identique restituant correctement la forme de l'anomalie magnétique.



*Fig. 3.2 : Données synthétiques sur la structure en "L" du CS150 (4,4 kHz) et du magnétomètre*

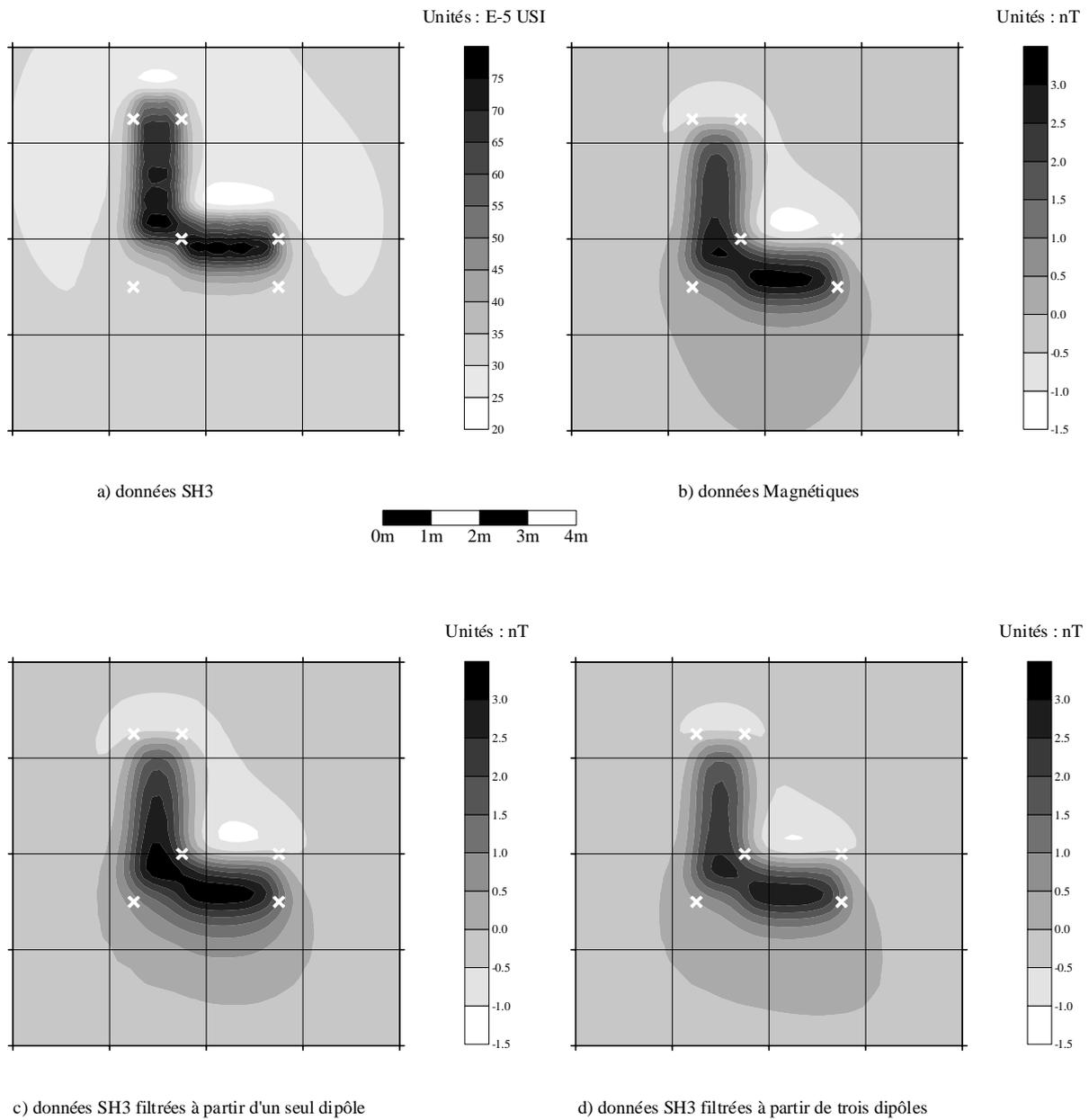


Fig. 3.3 : Données synthétiques sur la structure en "L" du SH3 et du magnétomètre

### II.2.3. Cas d'une structure en forme de plaque

La géométrie et la position de la plaque dans la carte de prospection sont présentées sur la figure 3.4. La méthode magnétique donne une définition relativement floue de la position des limites de ce type de structure. Alors que dans l'exemple précédent, une fonction de transfert calculée à partir d'un seul dipôle était bien adaptée pour le filtrage des données EM, il est intéressant ici, pour une structure très fine, d'évaluer l'erreur que peut entraîner une mauvaise estimation de la profondeur du dipôle.

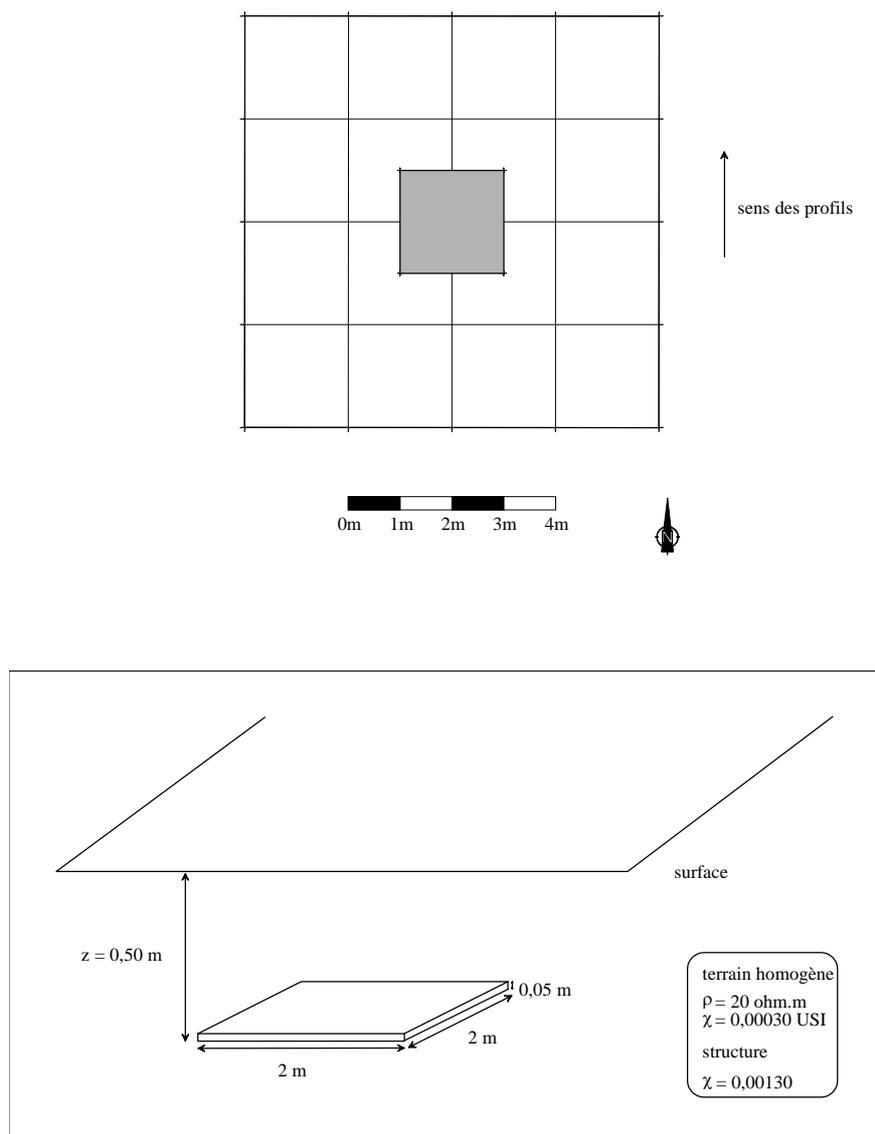
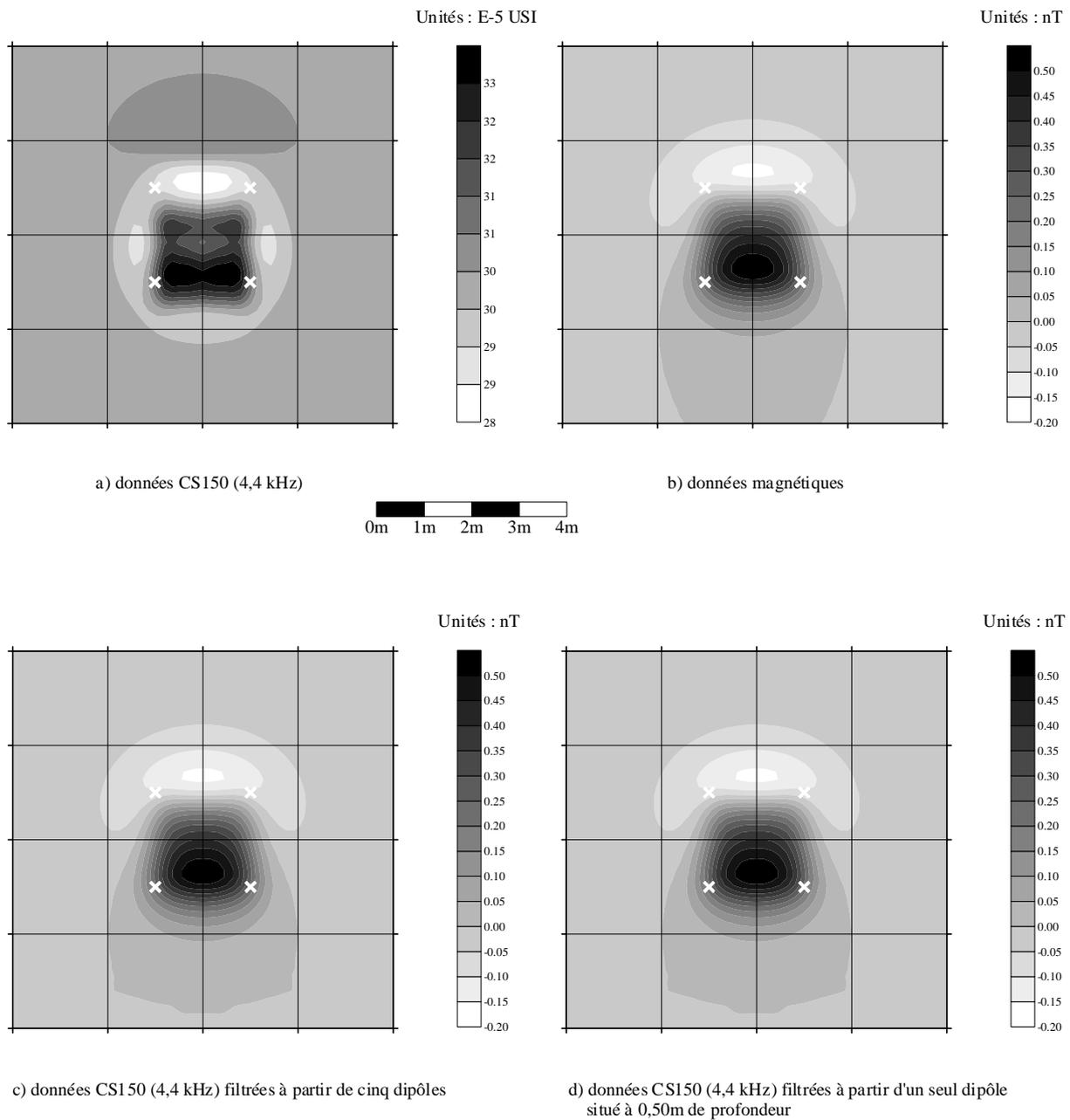


Fig. 3.4: Position et caractéristiques de la structure en forme de plaque

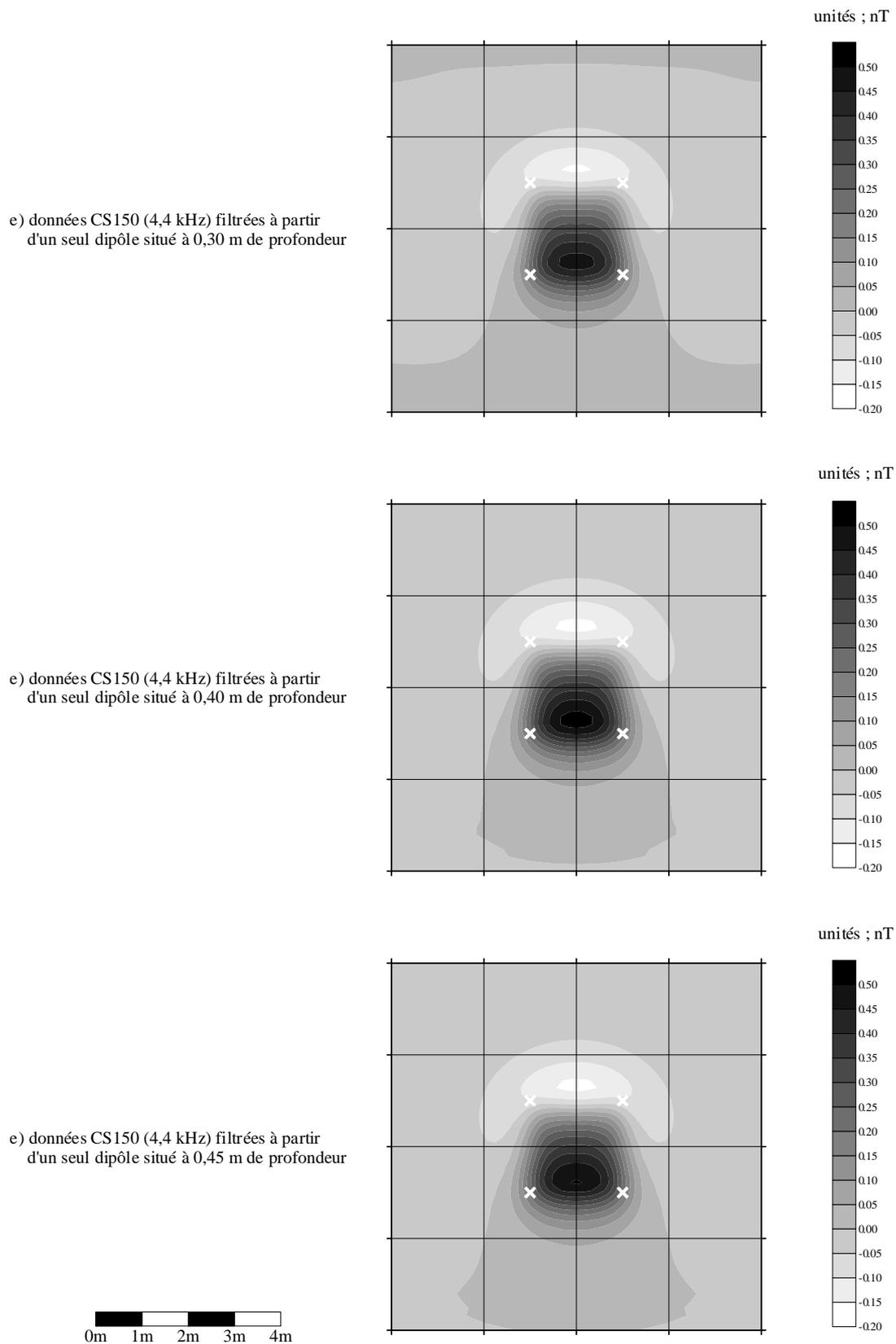
Dans le cas de la configuration CS150, on retrouve les mêmes caractéristiques que pour l'anomalie du "L" : la réponse est légèrement décalée par rapport à la position de la structure (fig. 3.5a) et la géométrie de la plaque est mieux rendue que sur la carte M où la forme de la plaque est difficilement perceptible (fig. 3.5b). Dans un premier temps, la fonction de transfert est calculée à partir de cinq dipôles situés entre 37,5 cm et 42,5 cm à 1 cm d'intervalle puis pour un dipôle à une profondeur moyenne de 50 cm. Comme dans le cas de la structure en "L", les résultats obtenus sont pratiquement identiques, alors qu'elle est beaucoup moins épaisse que le "L" (fig. 3.5c et 3.5d, tableau 3.3). La fonction filtre est ensuite calculée pour un seul dipôle, successivement situé à 30cm, 40 cm et 45 cm. La mauvaise estimation de la profondeur du dipôle est essentiellement marquée par une amplitude plus faible de l'anomalie magnétique (tableau 3.3). La forme de cette dernière varie peu ; la forme de la plaque est d'autant mieux restituée que la profondeur du dipôle est moindre (fig. 3.5e, 3.5f et 3.5g).

"Plaque" : CS150 (4.4 kHz)	minimum (nT)	maximum (nT)	somme (nT)	moyenne (nT)	écart-type
données M	-0,16	0,53	27,99	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$9,85 \cdot 10^{-2}$
données EM filtrées : 5 dipôles	-0,16	0,53	27,99	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$9,85 \cdot 10^{-2}$
données EM filtrées : 1 dipôle à 0,50 m	-0,16	0,53	27,99	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$9,85 \cdot 10^{-2}$
données EM filtrées : 1 dipôle à 0,45 m	-0,16	0,51	28	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$9,46 \cdot 10^{-2}$
données EM filtrées : 1 dipôle à 0,40 m	-0,16	0,50	28	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$9,09 \cdot 10^{-2}$
données EM filtrées : 1 dipôle à 0,30 m	-0,15	0,47	28	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$8,44 \cdot 10^{-2}$

*Tableau 3.3 : Anomalie de la plaque : caractéristiques des données obtenues sur la plaque en M et en EM pour le CS150 (4.4 kHz) après filtrage*



*Fig. 3.5 a, b, c et d : Données synthétiques sur la structure en forme de plaque du CS150 (4,4 kHz) et du magnétomètre.*



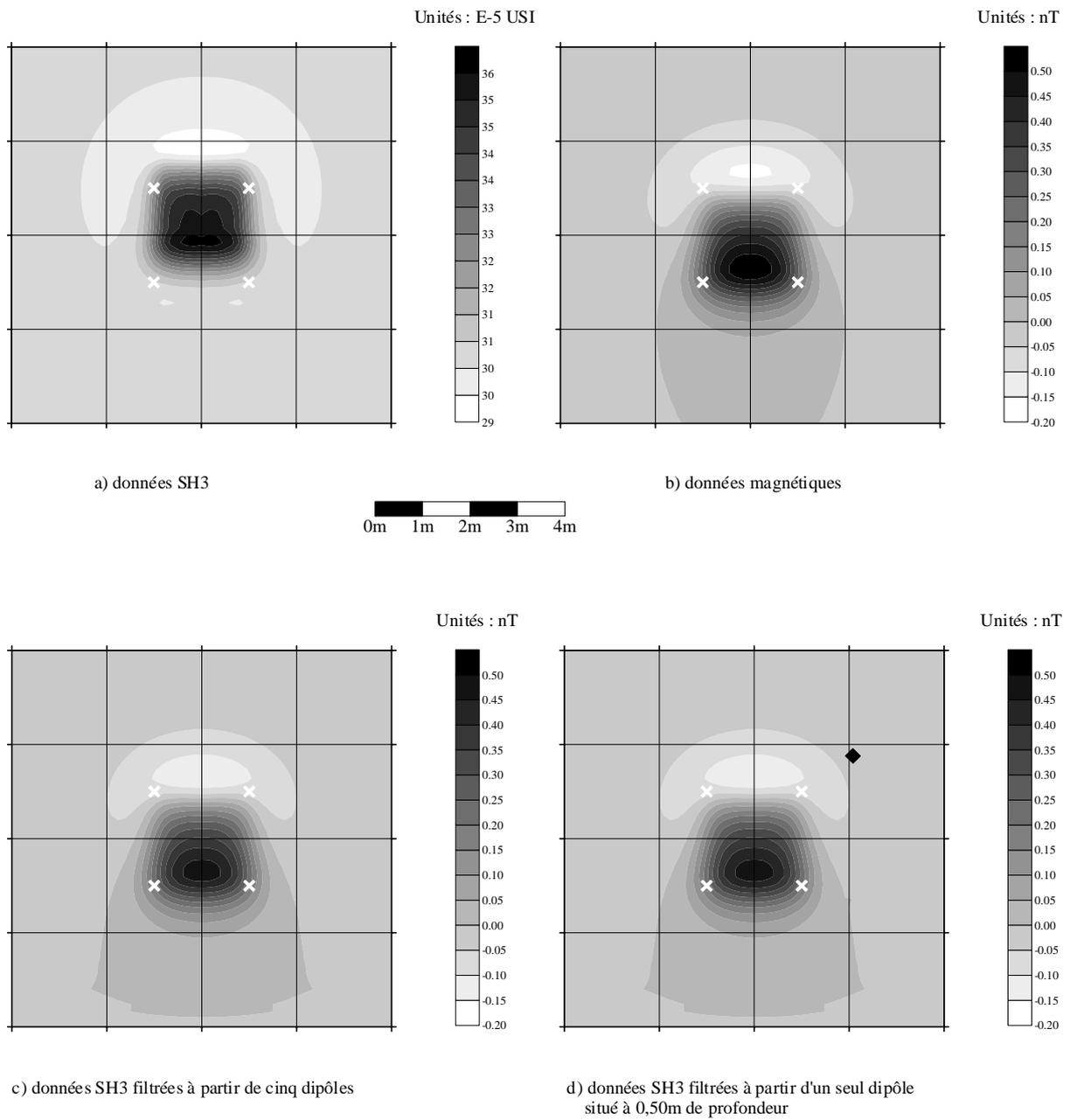
*Fig. 3.5 e, f et g : Données synthétiques de la structure en forme de plaque pour le CS150 (4,4 kHz)*

Dans le cas du SH3 (fig. 3.6a), les résultats obtenus après filtrage sont moins bons que pour le CS150, même pour une fonction de transfert calculée à partir de 5 dipôles (fig. 3.6c et 3.6d). Dans tous les cas, l'anomalie obtenue est d'une amplitude plus faible que l'anomalie magnétique (tableau 3.4). Pour les cas d'un dipôle situé successivement à 45 cm, 40 cm et 30 cm, les différences d'amplitude deviennent relativement importantes, même si la forme et la position des anomalies obtenues à partir des données électromagnétiques filtrées varient assez peu (fig. 3.6e, 3.6f et 3.6g).

La mauvaise estimation de la profondeur du dipôle servant à calculer la fonction de transfert peut donc entraîner une erreur non négligeable sur le résultat du filtrage. Cette erreur a pour effet de donner une anomalie marquée par un maximum et un minimum moins important que pour le magnétisme ; elle se traduit donc surtout sur l'amplitude des anomalies.

"Plaque" : SH3	minimum (nT)	maximum (nT)	somme (nT)	moyenne (nT)	écart-type
données M	-0,161	0,53	27,99	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$9,85 \cdot 10^{-2}$
données EM filtrées : 5 dipôles	-0,14	0,47	27,99	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$8,68 \cdot 10^{-2}$
données EM filtrées : 1 dipôle à 0,50 m	-0,14	0,47	27,99	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$8,69 \cdot 10^{-2}$
données EM filtrées : 1 dipôle à 0,45 m	-0,13	0,41	27,99	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$7,63 \cdot 10^{-2}$
données EM filtrées : 1 dipôle à 0,40 m	-0,12	0,37	27,99	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$6,84 \cdot 10^{-2}$
données EM filtrées : 1 dipôle à 0,30 m	-0,11	0,32	27,99	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$5,91 \cdot 10^{-2}$

*Tableau 3.4 : Anomalie de la plaque : caractéristiques des données obtenues sur la plaque en M et en EM pour le SH3 après filtrage*



*Fig. 3.6 a, b, c et d : Données synthétiques sur la structure en forme de plaque pour le SH3 et le magnétomètre*

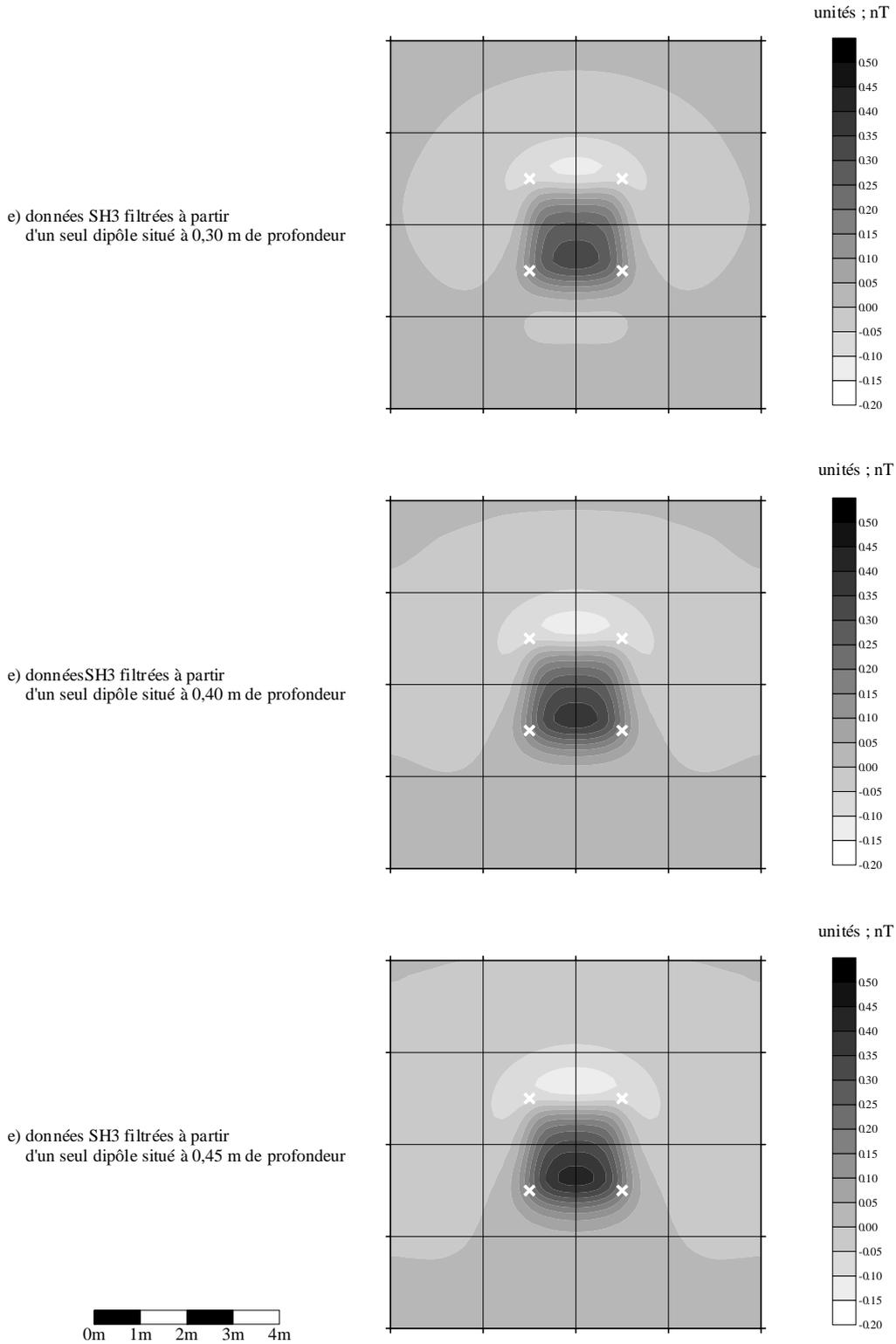


Fig. 3.6 e, f et g : Données synthétiques sur la structure en forme de plaque pour le

SH3

### II.2.4. Cas d'une structure en forme de cube à grande extension en profondeur

La géométrie et la position dans la carte de prospection de la structure en forme de cube sont présentées sur la figure 3.7. Le cube est situé entre 0,50 m et 2,50 m de profondeur ; les appareils slingram comme le SH3 ou le CS150 ne prennent donc en compte dans leurs mesures que sa partie supérieure, leur profondeur d'investigation étant respectivement de l'ordre de 0,70m et 1m pour la réponse en phase. Il est intéressant de voir la répercussion de ce phénomène sur le filtrage des données électromagnétiques ; la méthode magnétique est en effet, quant à elle, sensible l'ensemble de la structure.

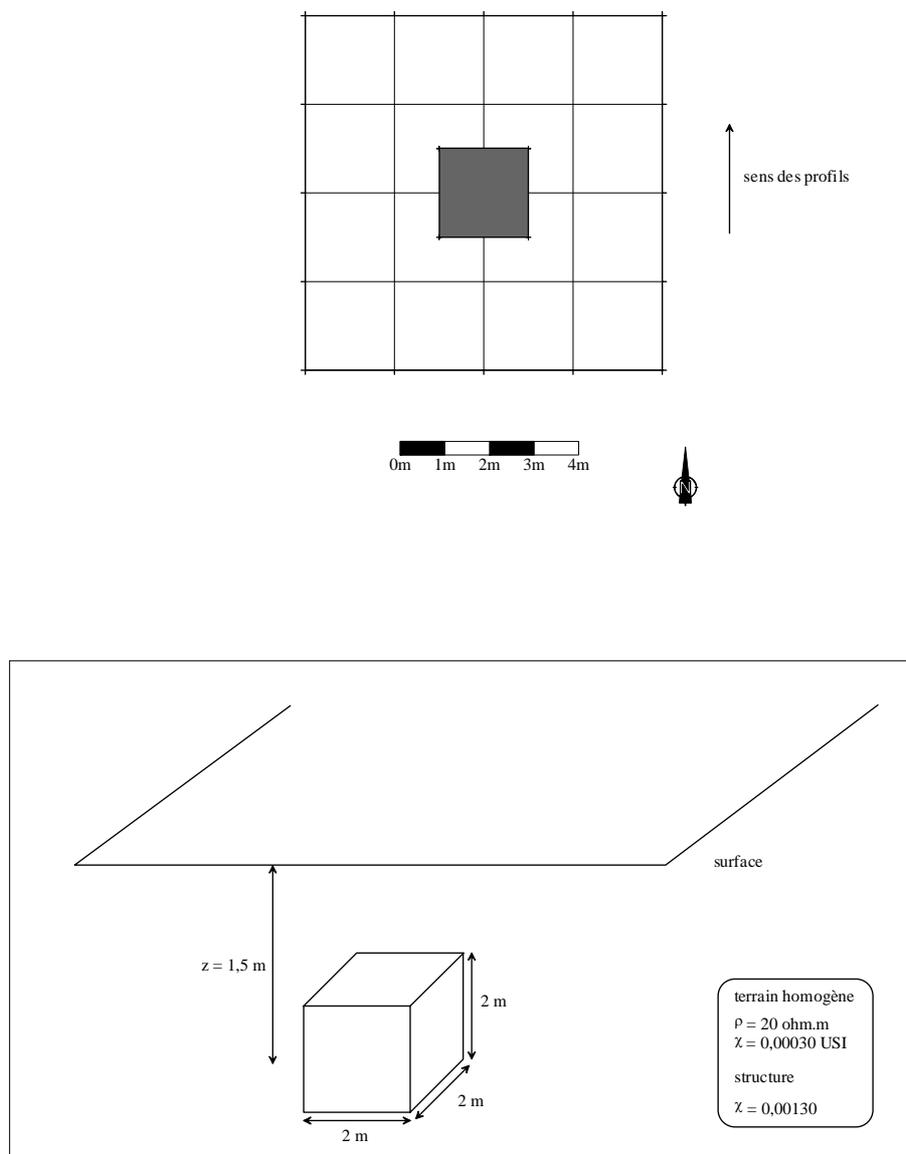
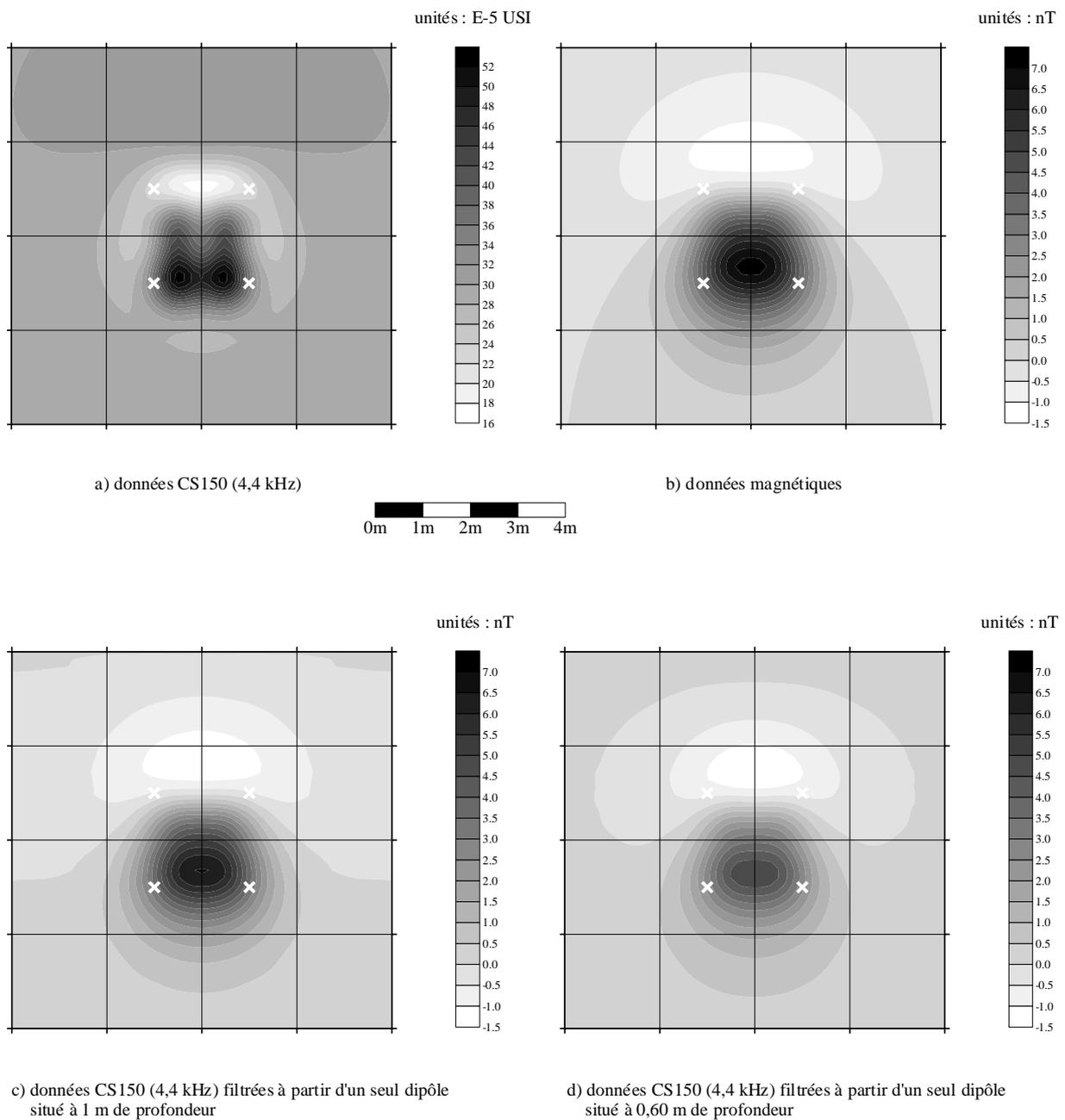


Fig. 3.7 : Position et caractéristiques de la structure en forme de cube

Contrairement aux cas précédents, l'anomalie obtenue pour le CS150 restitue mal la géométrie du cube (fig. 3.8a), ceci en raison de l'extension en profondeur de ce dernier. Avec une fonction de transfert calculée à partir d'un dipôle situé à 1m de profondeur, l'amplitude de l'anomalie obtenue à partir des données EM filtrées est légèrement inférieure à celle de l'anomalie magnétique dans un rapport d'environ 1,08 (pour un dipôle à 0,60 m de profondeur, ce rapport est de l'ordre de 1,36) (tableau 3.5). Même si la différence d'amplitude entre les anomalies EM et M reste faible, la différence de profondeur d'investigation entre le CS150 et le magnétomètre est ici clairement illustrée par les cartes obtenues (fig. 3.8c et 3.8d).

"Cube" : CS150 (4,4 kHz)	minimum (nT)	maximum (nT)	somme (nT)	moyenne (nT)	écart-type
données M	-1,31	7,21	924,57	0,35	1,47
données EM filtrées : 1 dipôle à 1 m	-1,39	6,53	924,51	0,35	1,29
données EM filtrées 1 dipôle à 0,60 m	-1,41	4,86	920,89	0,35	0,93

*Tableau 3.5 : Structure en cube : caractéristiques des données obtenues en M et en EM pour le CS150 (4,4 kHz) après filtrage.*

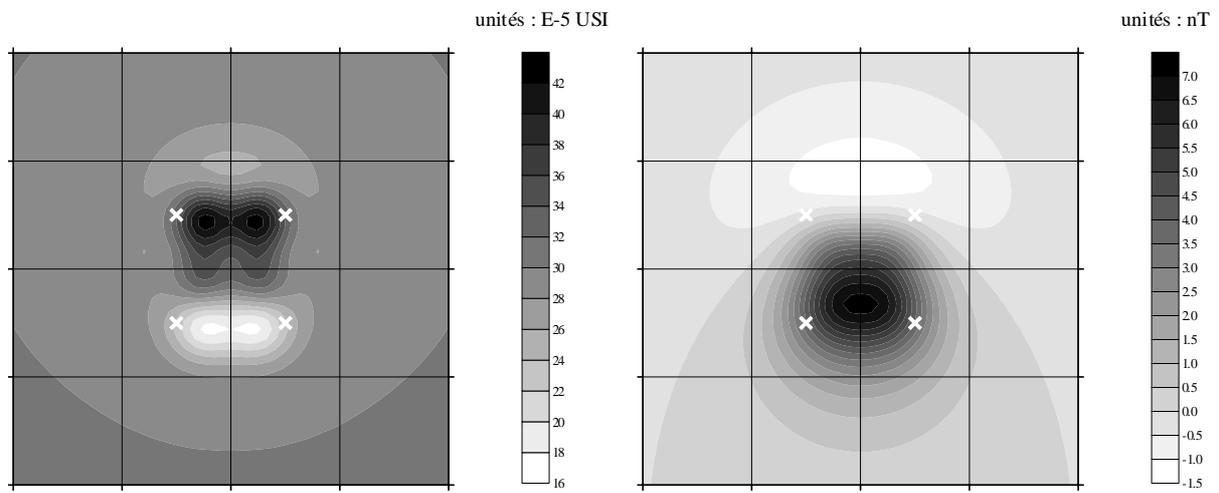


*Fig. 3.8 : Données synthétiques sur la structure en forme de cube pour le CS150 (4,4 kHz) et le magnétomètre*

Cette différence est encore plus marquée dans le cas du SH3 (fig. 3.9a) qui possède une profondeur d'investigation inférieure à celle du CS150. Si la fonction de transfert est calculée à partir d'un dipôle situé à 0,60 m de profondeur, la forme de l'anomalie obtenue rappelle plus celle du cas précédent de la plaque, que celle du cube. L'amplitude elle-même est quatre fois inférieure à celle de l'anomalie magnétique (tableau 3.6). Cette différence est la plus importante de tous les modèles présentés ici. La différence de profondeur d'investigation se présente donc comme le principal paramètre pouvant entraîner une erreur d'interprétation dans la comparaison des données EM filtrées et M (fig. 3.9c).

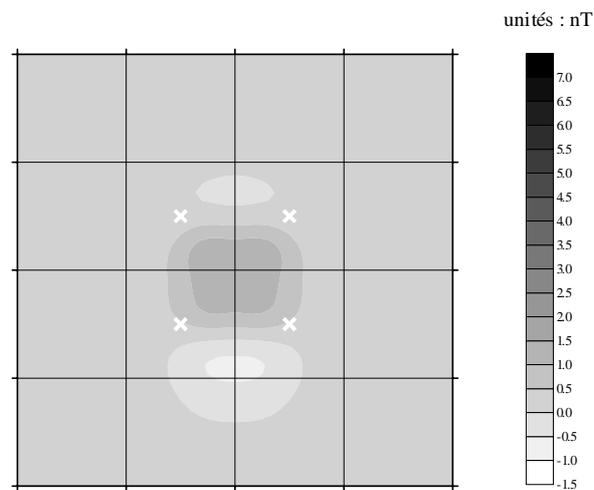
"Cube" : SH3	minimum (nT)	maximum (nT)	somme (nT)	moyenne (nT)	écart-type
données M	-1,31	7,21	924,57	0,35	1,47
données EM filtrées : 1 dipôle à 0,6 m	-0,59	1,45	920,89	0,35	0,24

*Tableau 3.6 : Structure en cube : caractéristiques des données obtenues en magnétisme et en électromagnétisme pour le SH3 après filtrage.*



a) données SH3

b) données magnétiques



c) données SH3 filtrées à partir d'un seul dipôle  
situé à 0,60 m de profondeur

*Fig. 3.9 : Données synthétiques sur la structure en forme de cube pour le SH3 et le magnétomètre*

### III. Conclusion

L'étude de ces cas synthétiques a permis d'évaluer les différences qui peuvent apparaître entre une anomalie magnétique mesurée au magnétomètre et celle calculée par filtrage linéaire des données électromagnétiques. Même pour une structure d'une épaisseur relativement importante, la fonction de transfert peut être calculée à partir d'un seul dipôle ; les données calculées pour un dipôle différent peu de celles calculées à partir d'une série de dipôles verticaux répartis sur toute l'épaisseur de la structure. La mauvaise estimation de la profondeur de la structure entraîne un écart plus marqué entre les données magnétiques et électromagnétiques ; cette différence reste le plus souvent faible mais ne doit pas être attribuée à la présence d'une aimantation rémanente ou visqueuse.

La profondeur d'investigation est le paramètre qui diffère le plus entre les deux méthodes de prospection. Il n'est donc pas étonnant qu'il entraîne des différences notables entre les données magnétiques et les données filtrées. Les appareils électromagnétiques ne détectant que la partie supérieure d'une structure étendue en profondeur donneront nécessairement après filtrage une anomalie de plus faible amplitude. Cet écart peut être important et d'autant plus grand que la profondeur d'investigation de l'appareil électromagnétique est faible ; il oblige à une certaine prudence dans la comparaison. Nous verrons dans le chapitre suivant que ce problème se pose même en prospection archéologique où pourtant, les structures sont, dans la plupart des cas, peu profondes.

---

## Chapitre 4 : Essais expérimentaux

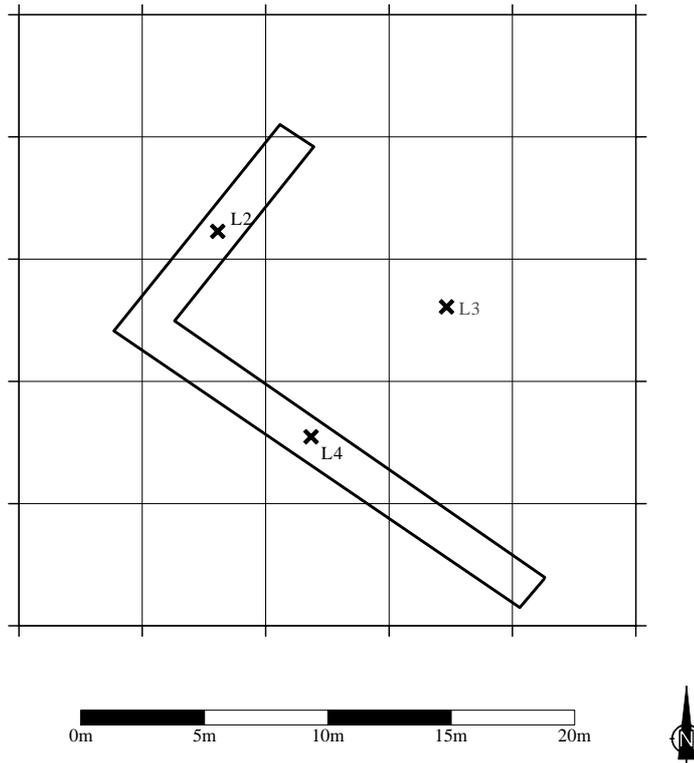
---

### I. Introduction

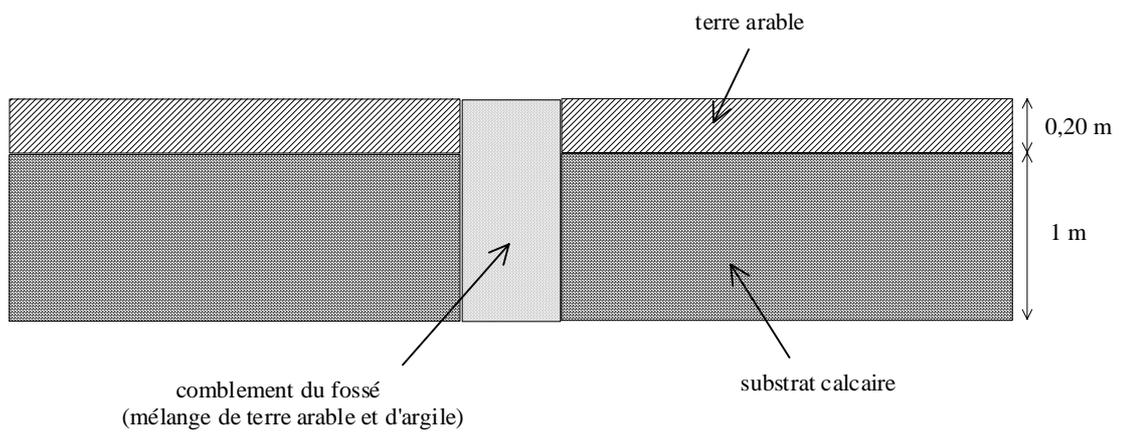
La première partie de ce chapitre est consacrée à des essais expérimentaux qui ont été réalisés en même temps que l'étude théorique sur les contraintes et les limites des appareils Slingram et des systèmes à boucles. Ces essais, réalisés sur une structure artificielle, ne concernent donc pas la méthode magnétique. L'intérêt de ce travail était d'une part, de vérifier expérimentalement les résultats théoriques, et d'autre part de justifier le choix des appareils utilisés sur des sites archéologiques pour la comparaison avec des cartes magnétiques par filtrage linéaire sur les données électromagnétiques. Le contexte archéologique se révélait en effet adapté pour les premiers tests de filtrage car le processus d'anthropisation entraîne dans beaucoup de cas des contrastes bien marqués dans les propriétés magnétiques du terrain. L'atelier de potier de Dampierre sous Bouhy a permis d'étudier le cas de structures dont une partie de l'aimantation était due à la rémanence. L'habitat gaulois de Verdun sur le Doubs offrait la possibilité d'étudier la réponse magnétique de structures caractérisées *a priori* par une aimantation induite mais dont l'extension en profondeur était susceptible d'engendrer des différences entre les données magnétiques et les données électromagnétiques filtrées.

### II. Structure en "L"

Les premiers essais expérimentaux ont été réalisés sur une structure artificielle en forme de "L" (structure "L1") au Centre de Recherches Géophysiques de Garchy (France). La branche située au nord a une longueur de 10 m et a été creusée sur une profondeur de 0,60 m ; celle au sud fait 20 m de long pour une profondeur de 1,20 m (fig. 4.1). Cette structure traverse l'horizon supérieur argileux sur une vingtaine de centimètres puis le substrat calcaire (Fig. 4.2). Quelques prélèvements d'échantillons ont en outre été réalisés (fig. 4.1) et analysés (tableaux 4.1, 4.2 et 4.3). Ces prélèvements ne concernent néanmoins que l'horizon supérieur au-dessus du substrat calcaire.



*Fig. 4.1 : Position de la structure "L1" dans la zone de prospection et localisation des échantillons prélevés à la tarière*

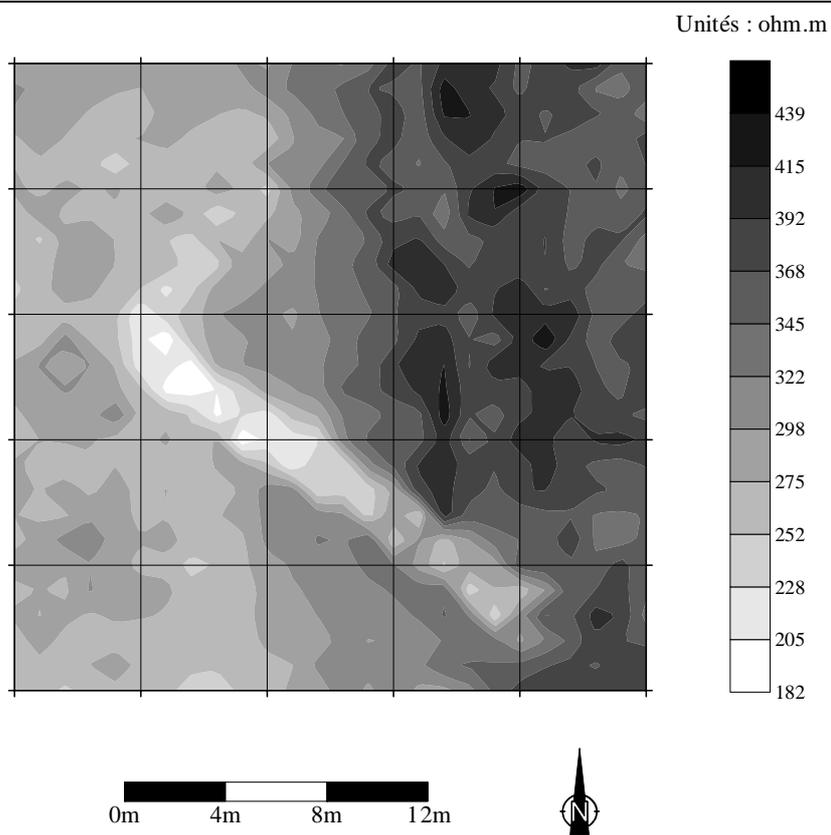


*Fig. 4.2 : Coupe verticale de la structure "L1"*

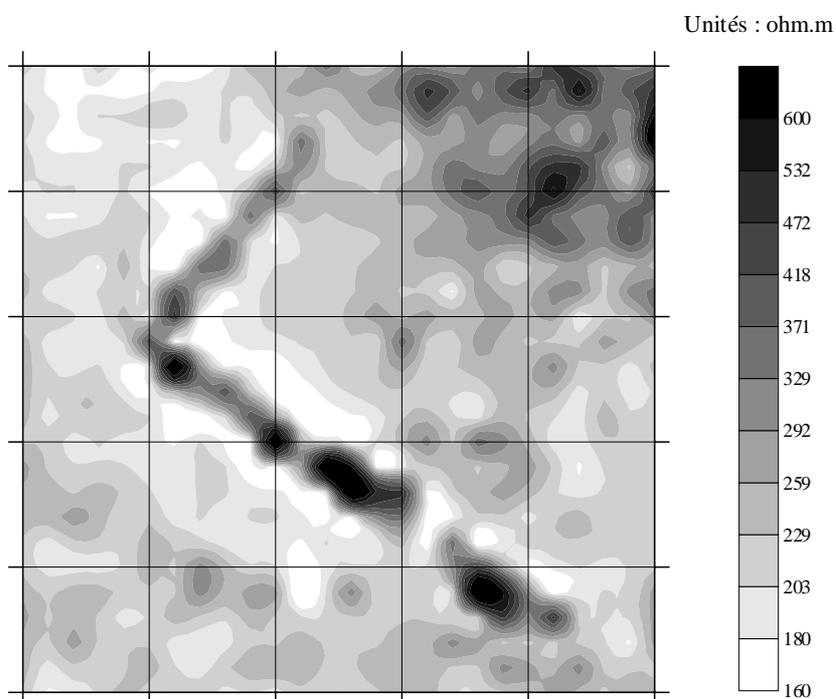
Plusieurs appareils Slingram (SH3, EM38 et CS150), ainsi qu'un système à boucles (Bartington), ont été testés sur cette zone. Cette série d'essais visait à comparer ces appareils, notamment en termes de profondeur d'investigation (Benech et Marmet, 1999). Il n'a pas été possible de réaliser une prospection magnétique en raison de plaques de fonte protégeant une ligne électrique au sol, passant à proximité, qui perturbait le signal ; ce cas montre bien la moindre sensibilité aux perturbations des appareils électromagnétiques par rapport aux appareils magnétiques.

Une prospection électrique, en configuration pôle-pôle ( $a=1$  m), a en outre été réalisée sur l'ensemble de la zone (fig. 4.3). La carte électrique présente un fort gradient de résistivité orienté est-ouest avec des valeurs allant de 400 ohm.m à 280 ohm.m. La structure "L1" est conductrice par rapport au terrain environnant avec des résistivités apparentes de l'ordre de 200 ohm.m. La branche nord apparaît beaucoup moins nette que la branche sud.

La deuxième carte de résistivité a été réalisée à partir des mesures en quadrature du SH3 (fig. 4.4). Le gradient orienté est-ouest, observé sur la carte électrique, est également visible mais la zone résistante est ici limitée à la partie nord-est de la carte, avec des valeurs de 350 ohm.m en moyenne. La partie conductrice présente quant à elle une résistivité moyenne de 250 ohm.m. Les valeurs de résistivité déduite de la réponse en quadrature du SH3 sont donc légèrement inférieures à celles mesurées en prospection électrique : cet écart est principalement dû à la différence de profondeur d'investigation entre les deux techniques. Les deux branches du "L1" apparaissent très clairement, mais le comblement est signalé comme résistant par rapport au milieu environnant. Cet effet est dû à l'orientation PARA des bobines du SH3 : dans le cas de structures conductrices de faible largeur (inférieure à l'écartement des bobines), le signal de la composante en quadrature change de signe ; la structure résistante apparaît alors comme conductrice et réciproquement (Tabbagh, 1986a). Ce changement de signe est aussi observable dans le cas d'une configuration HCP des bobines (Guérin et al., 1996). Ce défaut ne peut être corrigé qu'en utilisant d'autres orientations de bobines.



*Fig. 4.3 : Prospection électrique sur la structure "L1"*



*Fig. 4.4 : Prospection SH3 sur la structure "L1" (Composante en quadrature)*

## II.1. Mesure de la susceptibilité magnétique avec un appareil à boucles : le MS2 Bartington

Les deux branches du "L1" apparaissent très nettement sur la carte obtenue avec le MS2 (fig. 4.5). Elles apparaissent moins magnétiques ( $\chi_{app} \approx 30.10^{-5}$  USI) que le milieu environnant ( $\chi_{app} \approx 70.10^{-5}$  USI). Le MS2 a donc mesuré le contraste entre le sol superficiel et le comblement du "L1". Comme le prévoyait la courbe théorique dans le chapitre précédent (fig. 2.12), le MS2 est principalement sensible aux effets de surface et sa profondeur d'investigation ne dépasse pas 0,20 m. La bande de plus forte susceptibilité au nord de la carte est due à un apport de terre arable, amenée là pour combler les ornières d'un chemin forestier, ce qui confirme le caractère très superficiel des mesures effectuées.

Les résultats du MS2 peuvent être comparés avec ceux obtenus avec le DECCO. Il s'agit d'un appareil T.D.E.M. composé de deux cadres concentriques (0,52 m et 0,26 m de diamètre) conçu pour mesurer la viscosité magnétique apparente (Tabbagh et Dabas, 1996). La carte obtenue avec le DECCO (fig. 4.6) présente elle aussi un contraste négatif où le "L1" est marqué par de faibles valeurs de viscosité, dû à la faible profondeur d'investigation de l'appareil.

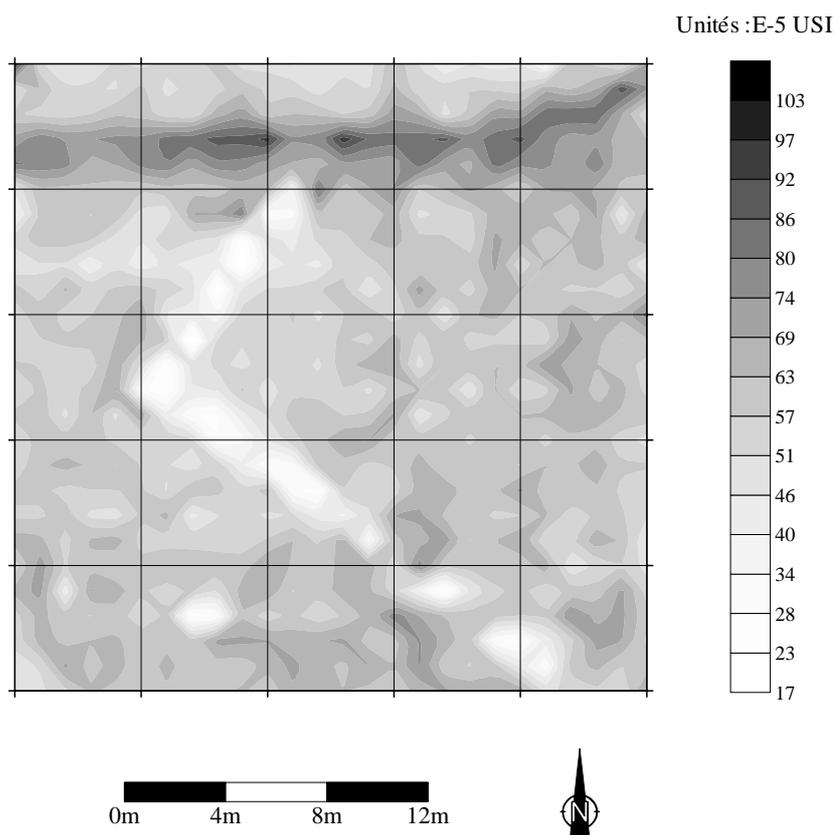


Fig. 4.5 : Prospection avec le MS2 Bartington sur la structure "L1"

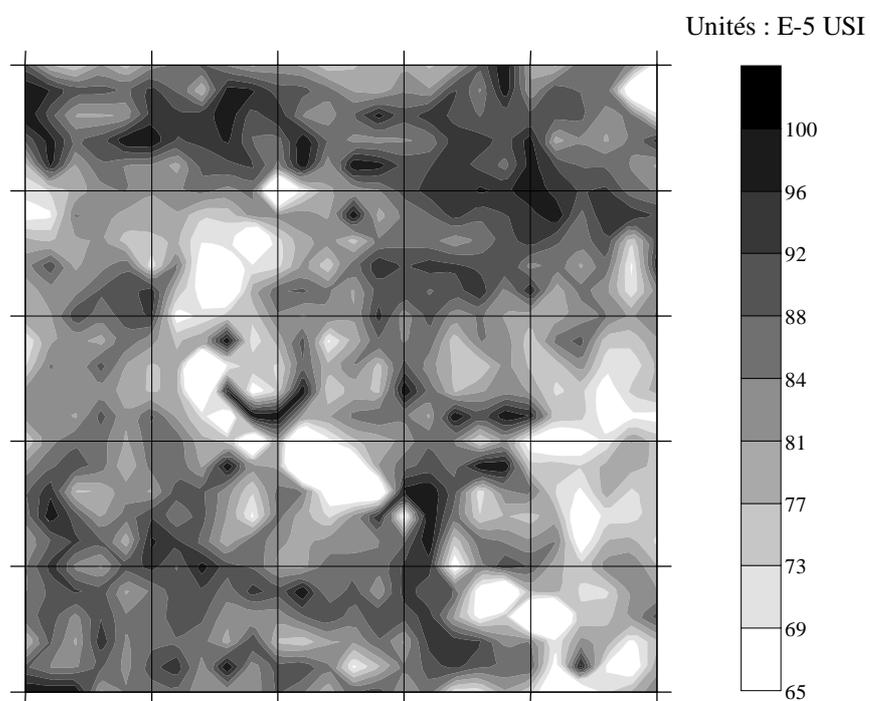


Fig. 4.6 : Prospection avec le DECCO sur la structure "L1"

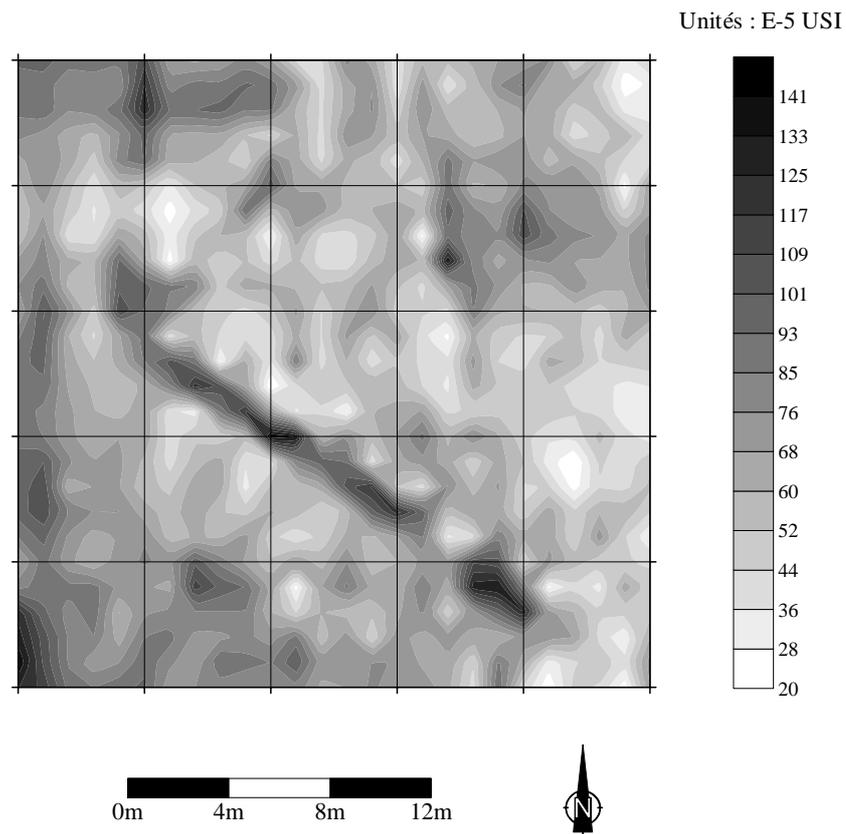
## II.2. Mesure de la susceptibilité magnétique avec les appareils Slingram

Les cartes obtenues à partir des appareils Slingram (SH3 (fig. 4.7), EM38 (fig. 4.8) et CS150 (fig. 4.9) ont pour point commun de ne pas détecter la branche nord du "L1". Ceci peut s'expliquer par le fait que la réponse obtenue est la somme de la réponse des vingt premiers centimètres, marquée par un contraste négatif (comblement-couche superficielle), et de la réponse des quarante centimètres suivants, marquée par un contraste positif (comblement-substrat calcaire), la somme de ces deux réponses étant pratiquement nulle. La branche sud, plus profonde est, quant à elle, détectée avec un contraste positif nettement marqué, prouvant par là la meilleure profondeur d'investigation des trois appareils Slingram.

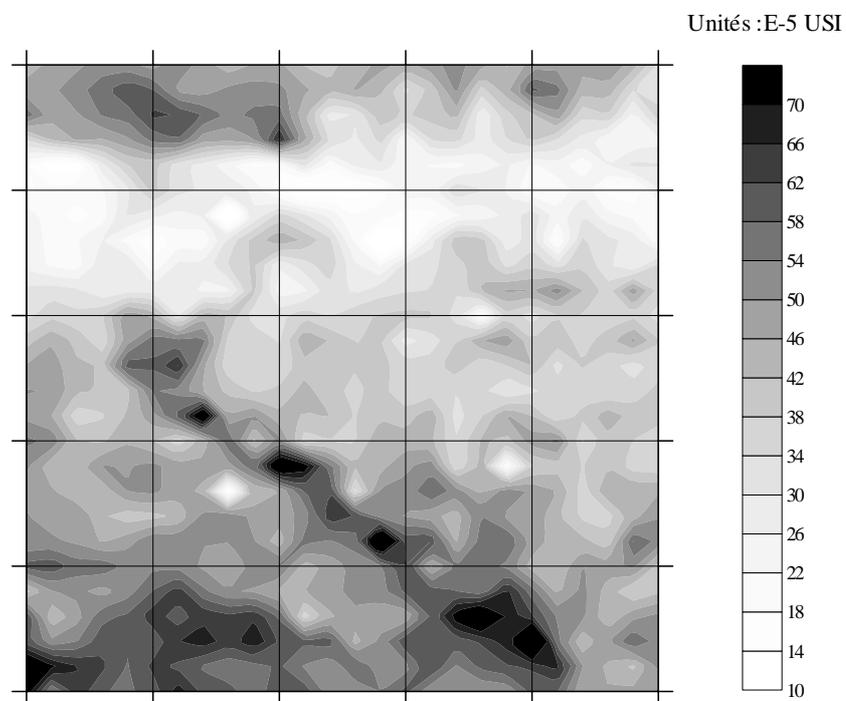
Dans le cas du SH3 (fig. 4.7), la branche est caractérisée par une susceptibilité magnétique apparente de l'ordre de  $110 \cdot 10^{-5}$  USI alors que le terrain environnant présente une susceptibilité magnétique de  $50 \cdot 10^{-5}$  USI en moyenne. L'anomalie de cette branche est légèrement décalée par rapport à celle obtenue avec le MS2. La dissymétrie de la réponse du SH3, observée à partir de données synthétiques pour une configuration de bobines PARA, se retrouve donc bien expérimentalement.

Les mesures de l'EM38 (fig. 4.8) donnent pour la branche sud une susceptibilité magnétique de l'ordre de  $70 \cdot 10^{-5}$  USI et de  $30 \cdot 10^{-5}$  USI pour le terrain environnant. La position de l'anomalie est identique à celle du MS2 ce qui confirme la meilleure symétrie de la réponse en configuration VCP, observée sur les modèles théoriques. Le comblement des ornières du chemin forestier est visible au nord, contrairement au SH3 et au CS150, moins sensibles aux effets superficiels.

Comme le SH3 et l'EM38, le CS150 détecte uniquement la branche sud (fig. 9). En raison d'un problème de calage de zéro sur le prototype, il n'est pas possible de comparer les valeurs de susceptibilité obtenues avec cet appareil. Il est néanmoins clair que le CS150 et le SH3, du fait du plus grand écartement entre les bobines, sont les deux appareils les moins sensibles aux effets de surface.



*Fig. 4.7 : Prospection avec le SH3 (composante en phase) sur la structure "L1"*



*Fig. 4.8 : Prospection avec l'EM38 (composante en phase, VCP) sur la structure "L1"*

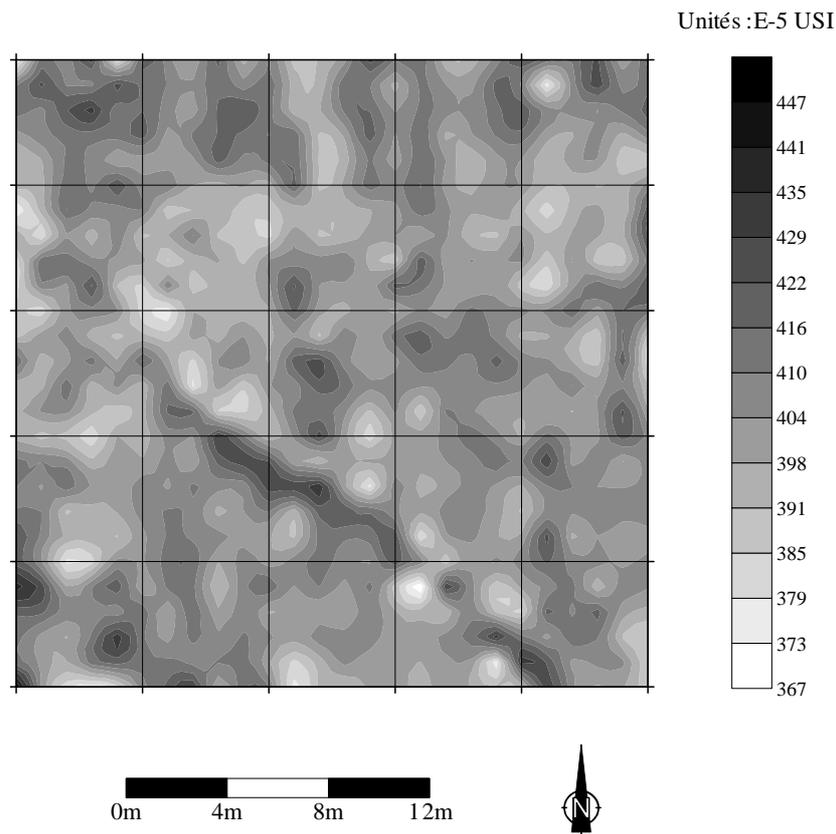


Fig. 4.9 : Prospection avec le CS150 (4,4 kHz, composante en phase) de la structure "L1"

### II.3. Mesures de susceptibilité magnétique en laboratoire

Les prélèvements ont été réalisés à la tarière sur les deux branches du "L1" et sur le terrain aux abords de la structure. Les mesures ont été réalisées au laboratoire de géomagnétisme de S<sup>t</sup> Maur (France) sur un susceptibilimètre KLY2 (Geofysika) (tableaux 4.1, 4.2 et 4.3).

Pour les couches superficielles (entre 0 et 10 cm), les résultats donnent des valeurs de susceptibilité magnétique volumique situées entre  $30 \cdot 10^{-5}$  et  $50 \cdot 10^{-5}$  USI pour le comblement du "L1" et de  $100 \cdot 10^{-5}$  pour le terrain avoisinant (la susceptibilité volumique est calculée pour une densité sèche de  $800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ). Nous retrouvons donc, à partir des mesures réalisées sur ces échantillons, le contraste négatif visible sur la carte du MS2 dont la raison est bien la faible profondeur d'investigation de cet appareil. L'écart des valeurs de susceptibilité mesurées sur les échantillons entre le comblement et le terrain avoisinant ( de l'ordre de  $60 \cdot 10^{-5}$  USI), est proche de celui mesuré avec le MS2 ( $\sim 40 \cdot 10^{-5}$  USI).

Pour les couches plus profondes (entre 10 et 30 cm), la susceptibilité magnétique du comblement augmente avec la profondeur pour atteindre des valeurs situées entre  $70 \cdot 10^{-5}$  et  $90 \cdot 10^{-5}$  USI. Il n'a pas été possible de poursuivre plus profondément les prélèvements à la tarière ; toutefois on peut attribuer au substrat calcaire une valeur moyenne de  $20 \cdot 10^{-5}$  USI. Nous retrouvons donc le contraste positif observé sur les cartes des appareils Slingram. Ce contraste, de l'ordre de  $60 \cdot 10^{-5}$  USI d'après les mesures sur échantillon, est cohérent avec celui mesuré en prospection (de l'ordre de  $60 \cdot 10^{-5}$  USI pour le SH3 et  $40 \cdot 10^{-5}$  USI pour l'EM38). Les mesures en laboratoire confirment donc la meilleure profondeur d'investigation des appareils Slingram par rapport aux systèmes à boucles.

"L1" : échantillon L1	Susceptibilité massique ( $10^{-8} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ )	Susceptibilité volumique ( $10^{-5}$ USI)
0 – 6 cm	49	40
12 – 21 cm	64	70
21 – 32 cm	60	90

*Tableau 4.1 : Mesures de susceptibilité massique et volumique sur la branche sud du "L1" (fig. 1)*

"L1" : échantillon L2	Susceptibilité massique ( $10^{-8} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ )	Susceptibilité volumique ( $10^{-5}$ USI)
0 – 8 cm	33	30
8 – 18 cm	34	40
18 – 24 cm	45	70

*Tableau 4.2 : Mesures de susceptibilité massique et volumique sur la branche nord du "L1" (fig. 1)*

"L1" : échantillon L3	Susceptibilité massique ( $10^{-8} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ )	Susceptibilité volumique ( $10^{-5}$ USI)
0 – 6 cm	120	100
12 – 21 cm	90	100
21 – 32 cm	87	100

*Tableau 4.3 : Mesures de susceptibilité massique et volumique sur le terrain avoisinant le "L1" (fig. 1)*

### III. Structure en "L" au lieu dit "Les Grands Pâturaux"

Située au lieu-dit "Les Grands Pâturaux", cette structure en "L" (que l'on appellera "L2" pour la différencier de la précédente) est plus ancienne que la précédente ; elle fut en effet creusée en 1973. Le comblement s'étant tassé avec les années, un apport supplémentaire a été amené récemment, afin d'éviter un effet topographique sur les différentes mesures de prospection. La couche superficielle ne dépasse pas ici 10 cm ; vient ensuite le substrat calcaire (fig. 4.10). Elle est constituée de deux branches égales de 8 m pour une épaisseur de 0,80 m et une profondeur de 0,80 m également ; l'une orientée est-ouest et l'autre nord-sud (fig. 4.11).

Plusieurs prospections ont été réalisées avec le MS2, le SH3 et l'EM38. La zone a en outre été couverte en prospection magnétique avec un magnétomètre à proton OMNI IV (EDA).

La carte de la réponse en quadrature du SH3 (fig. 4.12) montre une zone plus résistante au sud de la carte (~ 110 ohm.m) alors que la partie nord est marquée par une résistivité moyenne de 60 ohm.m. La structure "L2" apparaît très faiblement comme conductrice, avec des valeurs autour de 50 ohm.m pour les deux branches.

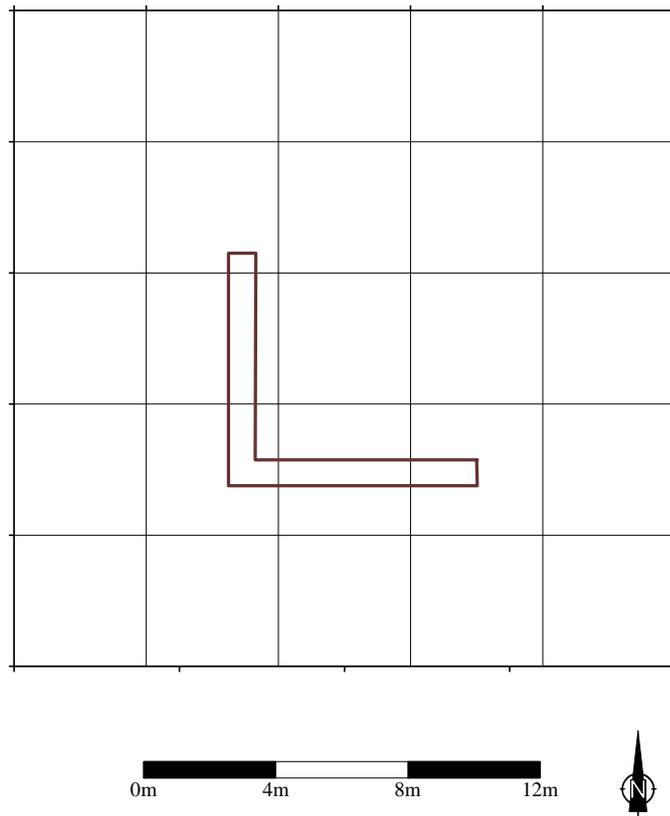


Fig. 4.10 : Position de la structure "L2" dans la zone de prospection

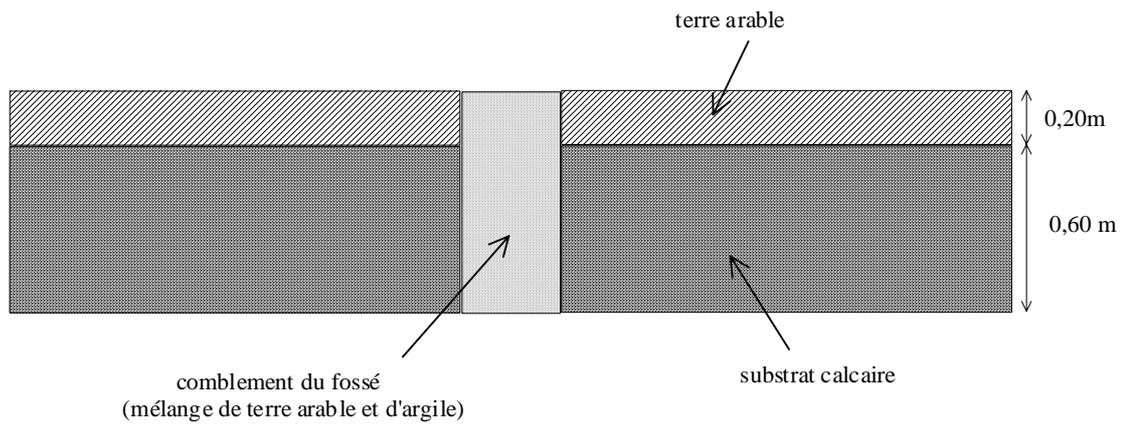


Fig. 4.11 : Coupe verticale de la structure "L2"

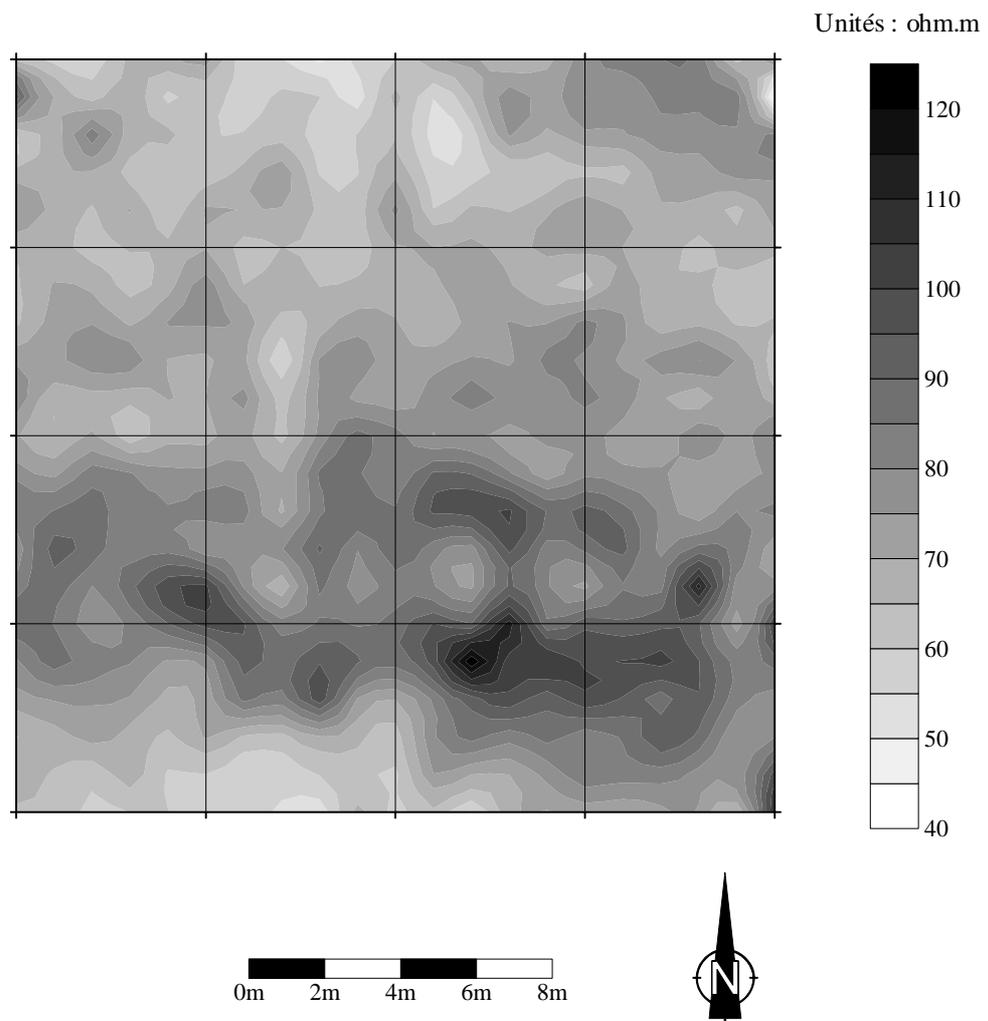


Fig. 4.12 : Prospection SH3 (composante en quadrature) de la structure "L2"

### III.1. Comparaison des cartes électromagnétiques

Concernant la profondeur d'investigation des appareils électromagnétiques, les résultats obtenus ici confirment ceux de la structure en "L" précédente. Les mesures réalisées avec le MS2 restituent l'aspect superficiel de la structure "L2" (fig. 4.13). Cette dernière est marquée par l'apport récent –et irrégulier- qu'elle a reçu avec un contraste très marqué,  $70 \cdot 10^{-5}$  USI, contre  $30 \cdot 10^{-5}$  USI pour le terrain environnant. La faible profondeur d'investigation ne permet pas de détecter correctement les deux branches du "L2", masquées par le comblement.

Les mesures réalisées avec le SH3 (fig. 4.14) restituent parfaitement les deux branches du "L2" marquées par une susceptibilité de l'ordre de  $90 \cdot 10^{-5}$  USI alors que le terrain environnant présente une susceptibilité moyenne de  $25 \cdot 10^{-5}$  USI. Grâce à sa meilleure profondeur d'investigation et sa moindre sensibilité aux effets de surface, les mesures réalisées avec le SH3 ne sont pas affectées par l'apport récent en surface. Le terrain environnant est en outre marqué par un gradient de susceptibilité allant de  $40 \cdot 10^{-5}$  USI au nord-est à  $20 \cdot 10^{-5}$  USI au sud-ouest de la carte.

La carte de réponse de l'EM38 (configuration VCP) constitue un "intermédiaire" entre les résultats obtenus pour le MS2 et le SH3 (fig. 4.15) : les deux branches sont visibles mais marquées tout de même par les irrégularités du comblement. Si les valeurs de susceptibilités obtenues sur la structure ( $\sim 80 \cdot 10^{-5}$  USI) se rapprochent de celles du SH3, le terrain environnant a une susceptibilité apparente moyenne légèrement supérieure à  $30 \cdot 10^{-5}$  USI, signalant par là une réponse plus superficielle et par conséquent une plus faible profondeur d'investigation. Le gradient de susceptibilité du terrain environnant est moins marqué que sur la carte du SH3, mais est tout de même perceptible avec des valeurs allant de  $45 \cdot 10^{-5}$  USI dans la partie nord de la carte à  $25 \cdot 10^{-5}$  USI au sud. Ce gradient de susceptibilité, invisible sur la carte du Bartington, doit par conséquent concerner les couches moins superficielles (il correspond probablement à une augmentation de l'épaisseur de l'horizon superficiel).

La bande plus magnétique au nord de la carte est due à un chemin forestier passant à proximité de la structure : contrairement au cas précédent, il est ici détecté par les trois appareils, la réponse la plus nette étant celle du MS2.

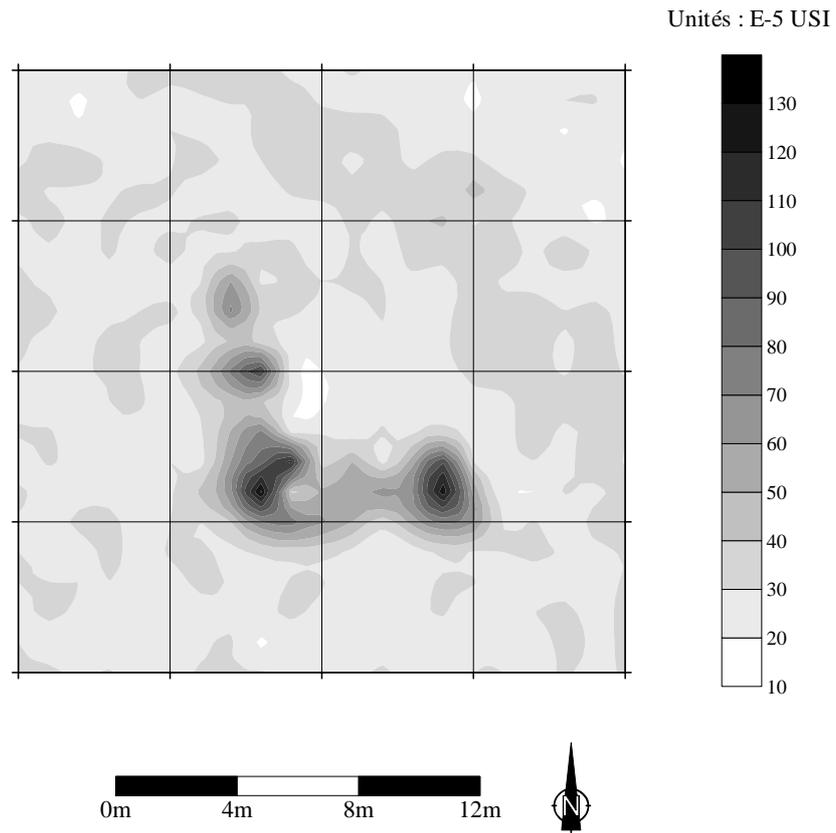


Fig. 4.13 : Prospection avec le MS2 Bartington sur la structure "L2"

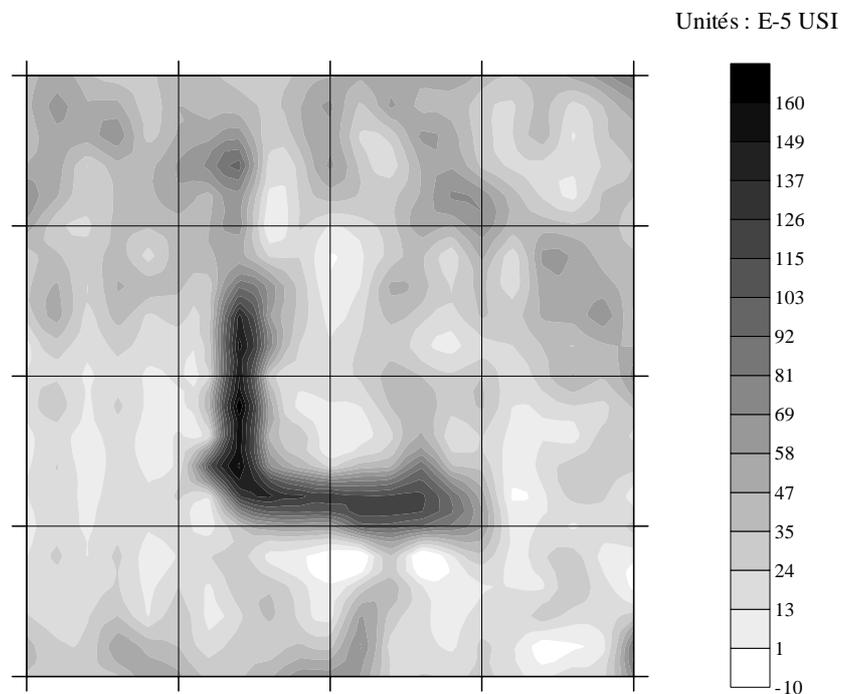
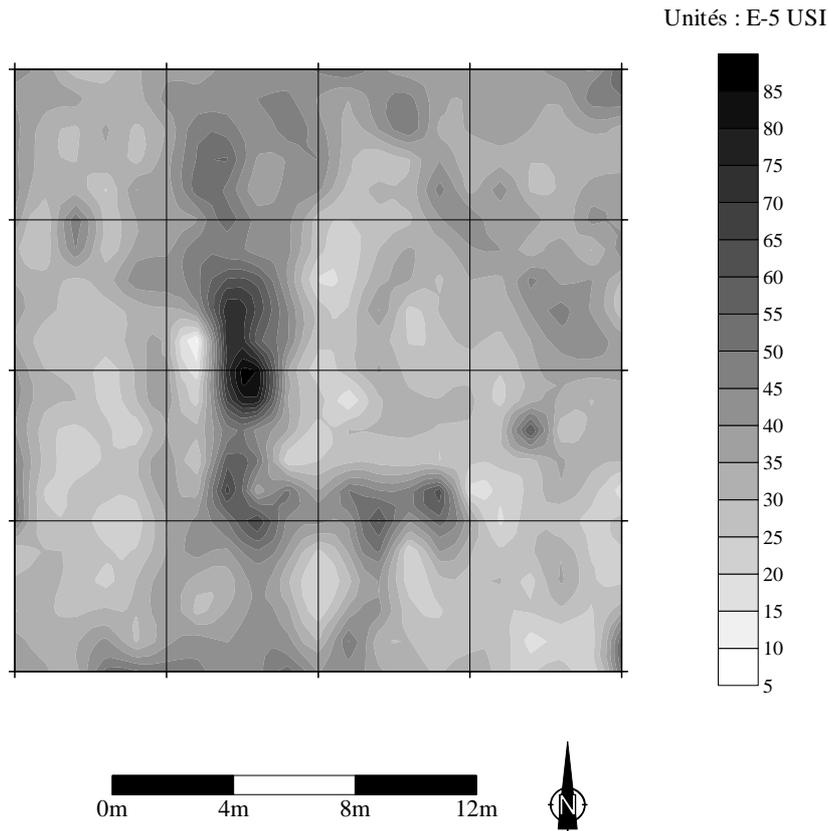


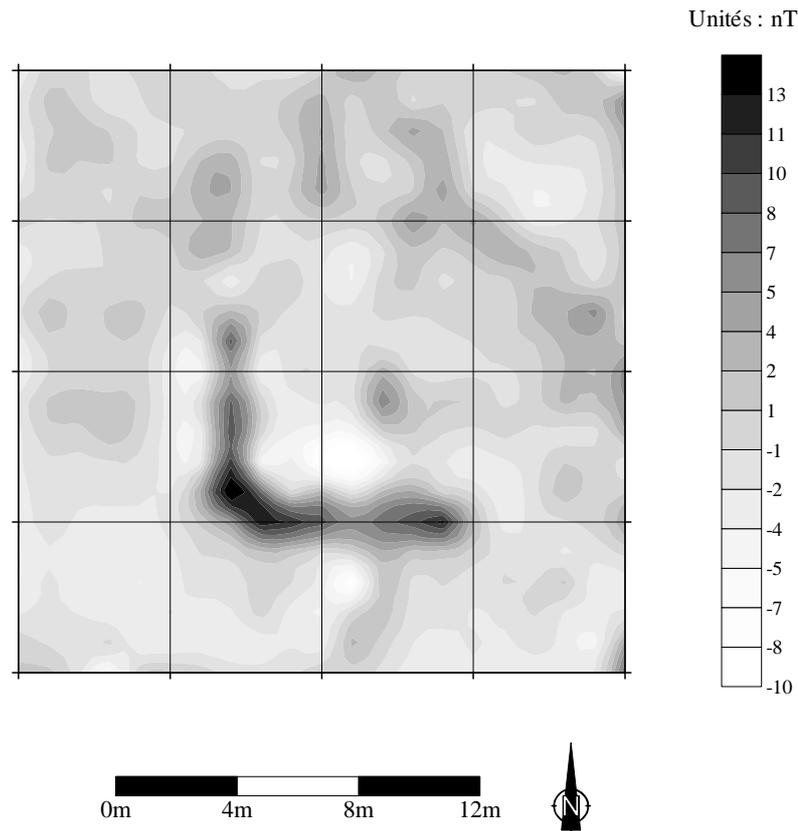
Fig. 4.14 : Prospection avec le SH3 (composante en phase) sur la structure "L2"



*Fig. 4.15 : Prospection avec l'EM38 (VCP, composante en phase) sur la structure "L2"*

### III.2. Comparaison des cartes de prospections magnétique et électromagnétique

La prospection magnétique a été réalisée avec un sonde à 40 cm de hauteur par rapport au sol (fig. 4.16). Les deux branches sont clairement mises en évidence mais se manifestent sur un nombre plus faible de mesures que dans le cas du SH3. Le gradient magnétique orienté nord-sud du terrain environnant est aussi visible. Les valeurs les plus fortes se situent à l'intersection des deux branches ainsi qu'à l'extrémité de la branche est-ouest. Ces maximums sont également visibles sur la carte du Bartington et marquent les emplacements où les rajouts de terre ont été les plus importants. Le magnétomètre restitue néanmoins les deux branches du "L2" de manière sensiblement plus homogène.



*Fig. 4.16 : Prospection magnétique avec le magnétomètre à proton OMNI IV sur la structure "L2"*

Les cartes du magnétomètre et du SH3 donnent des résultats très proches, tant sur la structure "L2" que sur l'ensemble de la zone. La structure "L2" apparaît moins nettement sur la carte EM38, en particulier la branche est-ouest, orientée perpendiculairement par rapport aux profils. Comme pour la structure "L1", les valeurs de susceptibilité magnétique obtenues avec l'EM38 sont sensiblement plus faibles que celles du SH3.

On a calculé par filtrage la carte d'anomalie de l'aimantation induite correspondant aux mesures du SH3 : la fonction de transfert est calculée successivement à partir des trois configurations de dipôles suivantes :

- a) un dipôle à 0,50 m de profondeur
- b) trois dipôles à 0,40 m, 0,50 m et 0,60 m de profondeur
- c) cinq dipôles entre 0,30 m et 0,60 m de profondeur

ceci pour un terrain à deux couches : une couche superficielle de 0,10 m d'épaisseur et de susceptibilité magnétique  $50 \cdot 10^{-5}$  USI, une seconde inférieure, de susceptibilité  $30 \cdot 10^{-5}$  USI, les deux couches ayant une résistivité de 100 ohm.m.

### III.2.1. Filtrage des données SH3

Les cartes d'anomalie d'aimantation induite, obtenues à partir des données SH3, donnent des amplitudes de valeurs légèrement inférieures à celle de la carte magnétique (fig. 4.17a, b et c). Le nombre de dipôles utilisés pour calculer la fonction de transfert n'entraîne que peu de variations sur les valeurs obtenues. Les courbes p7 et 114 représentent respectivement les valeurs obtenues le long du profil 7, comprenant le maximum de la branche nord-sud, et de la ligne 14, comprenant les maximums de la branche est-ouest (fig. 4.18a et b). Les données du magnétomètre sont moins bien alignées que celles du SH3 mais tant sur les branches du "L2" que de part et d'autre, les courbes moyennes sont très proches (fig. 4.19a et b). Ces courbes montrent le léger décalage de l'anomalie obtenue avec le magnétomètre par rapport à la structure. La différence d'amplitude, quant à elle, peut être expliquée par l'existence d'une aimantation visqueuse accumulée pendant 26 ans.

### III.2.2. Filtrage des données EM38

Le filtrage des données EM38 donne une carte dont les valeurs sont très inférieures à celle du magnétomètre sur la structure "L2" (fig. 4.20a, b et c). Les valeurs de susceptibilité de la carte électromagnétique, plus faibles que celles du SH3, entraînent nécessairement une anomalie magnétique de moindre amplitude, visible sur les courbes du profil 7 et de la ligne 14 (fig. 4.21a et b). Cette différence est vraisemblablement due à la faible profondeur d'investigation de l'EM38, qui ne dépasse pas 0,40 m et ne peut par conséquent détecter l'ensemble de la structure "L2".

### III.2.3. Conclusion

Ce premier essai de filtrage confirme les résultats obtenus dans le cas de données synthétiques. Un seul dipôle situé à une profondeur moyenne constitue une bonne approximation pour le calcul du filtre, les différences de valeurs restant faibles suivant le nombre de dipôles utilisés. La différence majeure entre les données magnétiques et les données électromagnétiques filtrées est due à la différence de profondeur d'investigation. Il est donc nécessaire de bien maîtriser ce paramètre et d'estimer la profondeur des sources magnétiques afin de pouvoir réaliser une comparaison fiable.

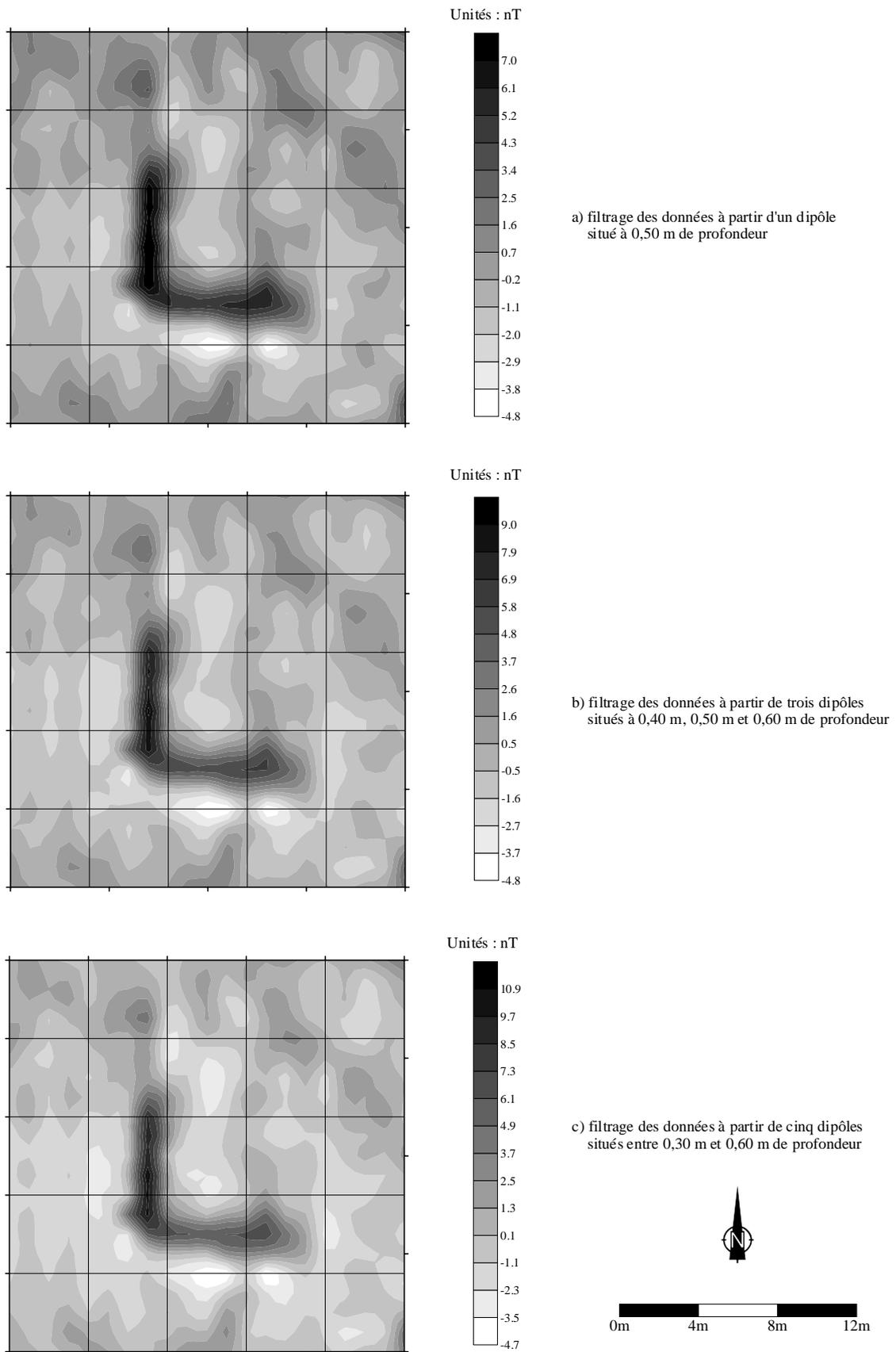


Fig. 4.17 : Filtrage des données SH3 acquises sur la structure "L2"

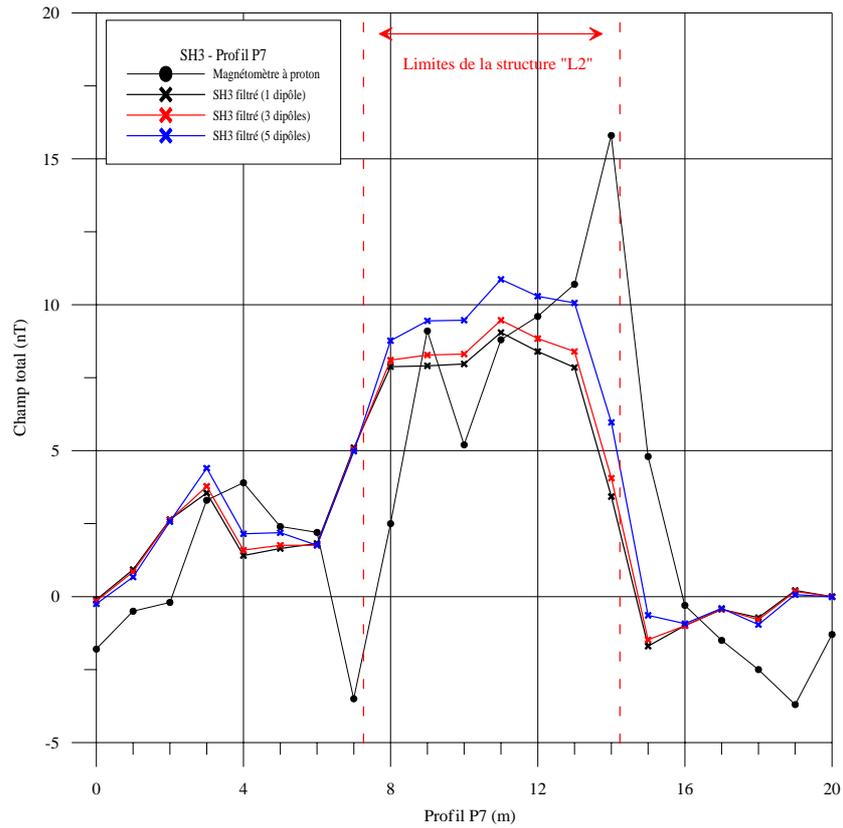


Fig. 4.18a : Représentation des valeurs obtenues par filtrage sur le profil P7

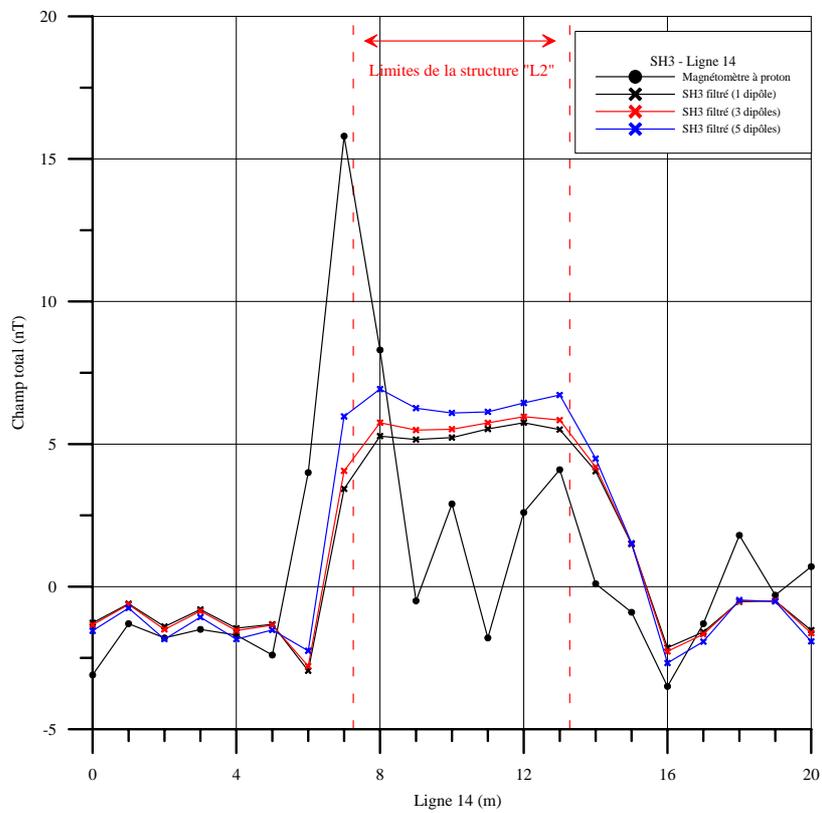


Fig. 4.18b : Représentation des valeurs obtenues par filtrage sur la ligne 14

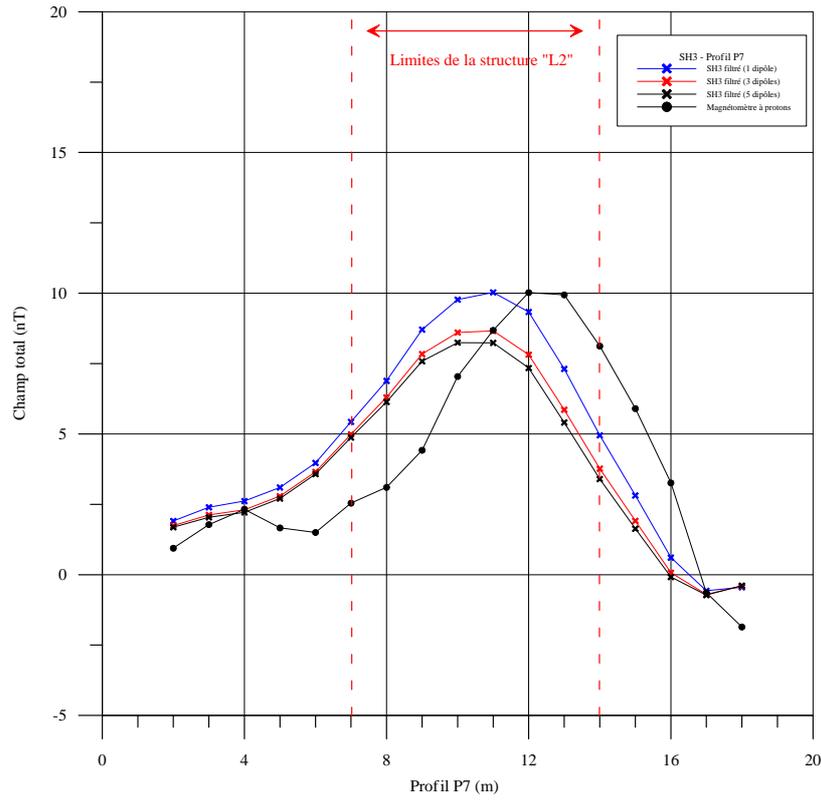


Fig. 4.19a : Représentation moyennée des valeurs obtenues par filtrage sur le profil P7

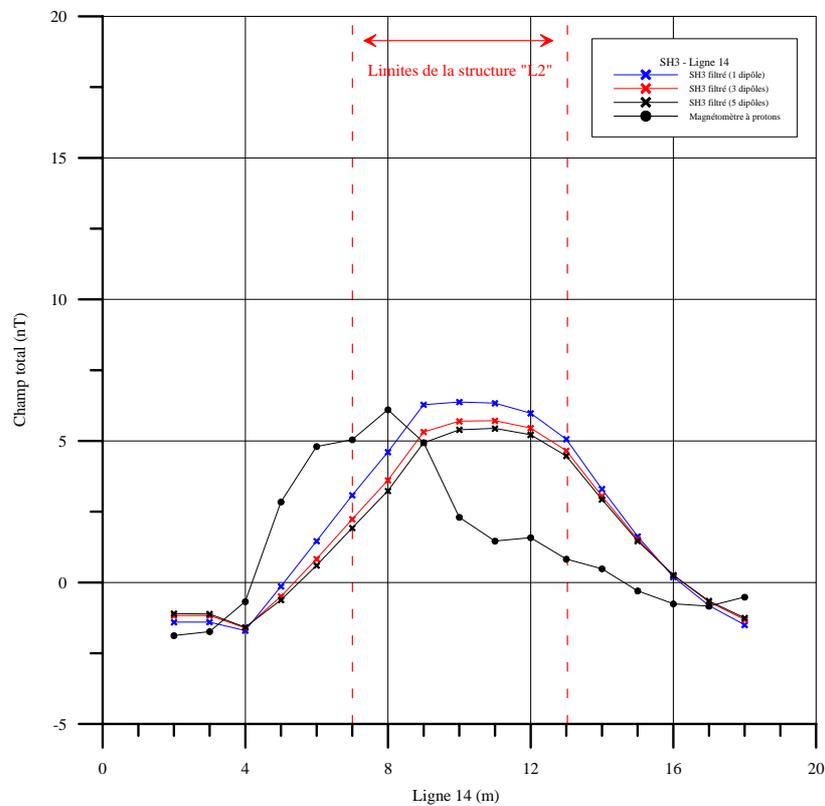


Fig. 4.19b : Représentation moyennée des valeurs obtenues par filtrage sur la ligne 14

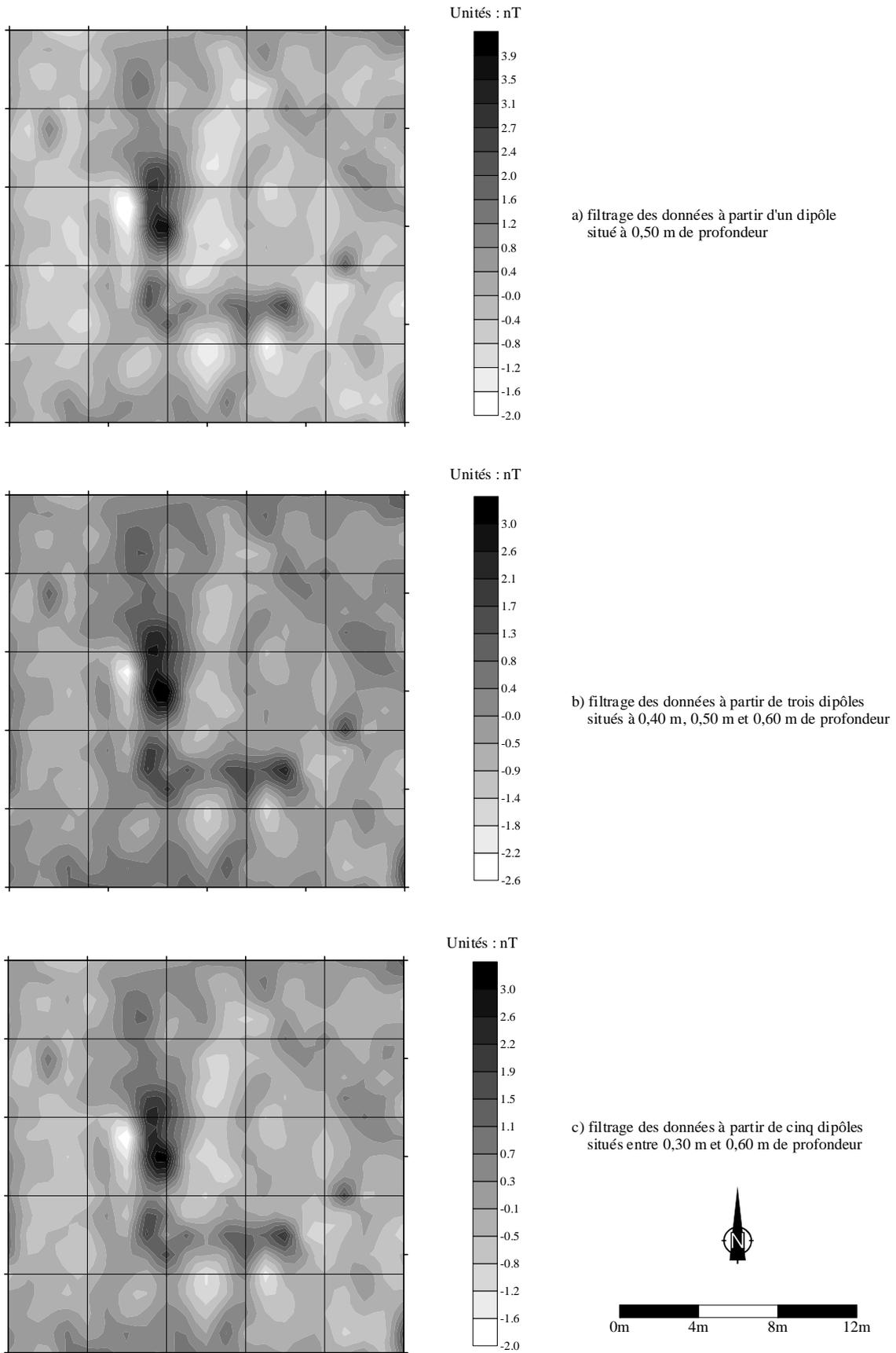


Fig. 4.20 : Filtrage des données EM38 acquises sur la structure "L2"

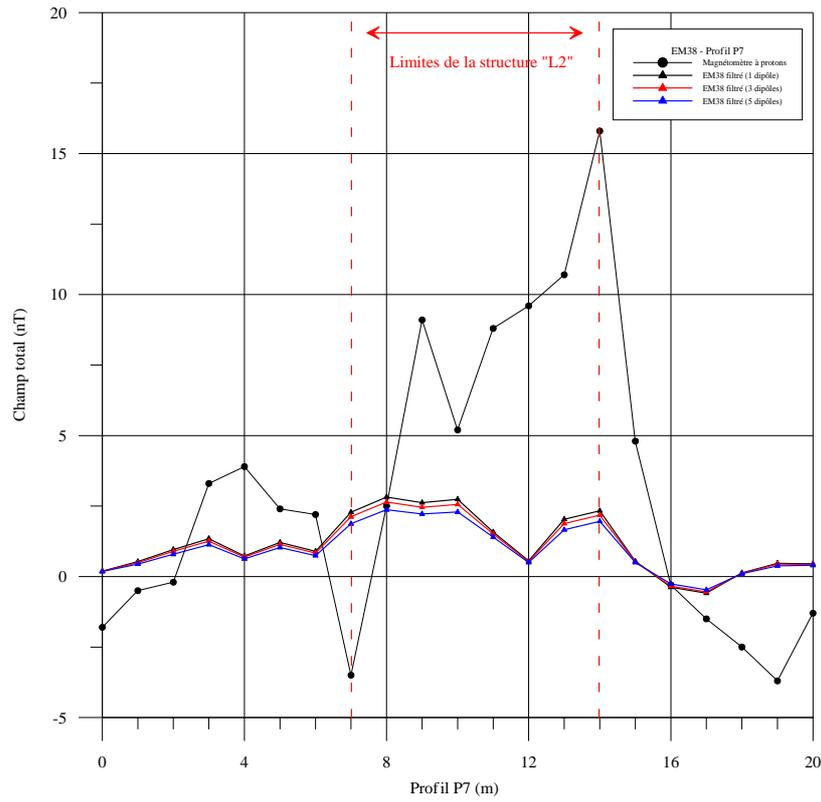


Fig. 4.21a : Représentation des valeurs obtenues par filtrage sur le profil P7

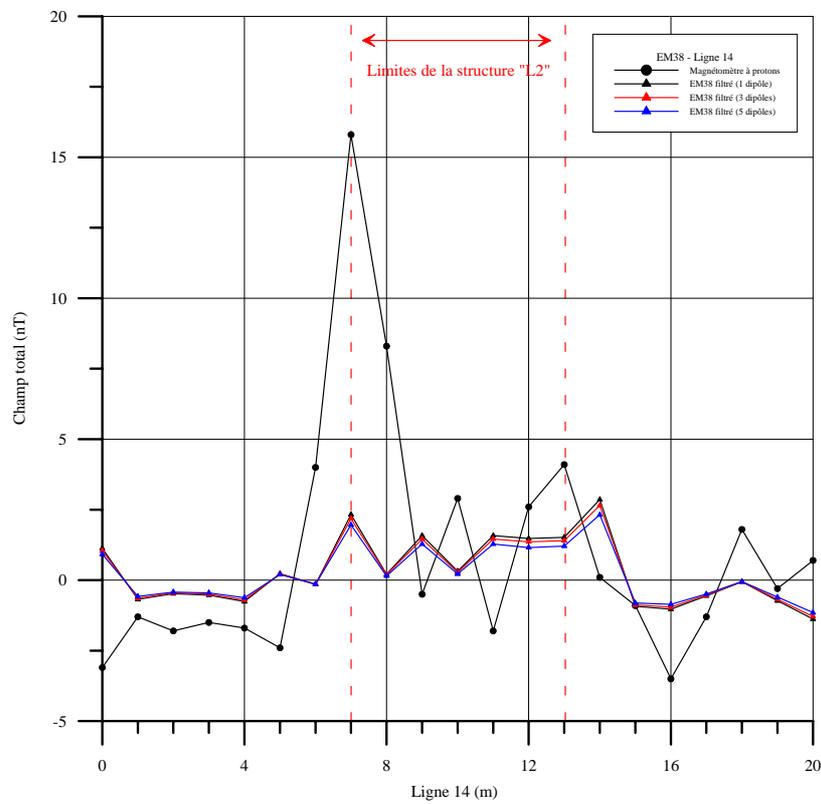


Fig. 4.21b : Représentation des valeurs obtenues par filtrage sur la ligne 14

## IV. L'atelier de potier de Dampierre sous Bouhy

### IV.1. Introduction

Cet atelier de potiers, daté du XVII<sup>e</sup> siècle, est situé sur la commune de Dampierre sous Bouhy (Nièvre), au lieu-dit "Le Chaillou" (fig. 4.22). Il a été découvert par prospection pédestre grâce à la présence de grandes quantités de céramiques dans les labours. Ce site a fait l'objet d'une première prospection électromagnétique "large maille" (maille carrée de 5 m) avec le SH3 pour la méthode Slingram, et le DECCO, pour la méthode T.D.E.M.. Une deuxième campagne a ensuite été réalisée en maille fine (maille carrée de 1m) sur une des zones les plus magnétiques : cette zone a été couverte en électromagnétisme avec le SH3 et en magnétisme avec le gradiomètre G858 (Geometrics). Les ateliers de potiers présentent généralement des propriétés magnétiques bien contrastées. Dampierre sous Bouhy constitue donc un site d'essai intéressant pour l'étude des propriétés magnétiques des sols anthropisés. Les fours ont en outre l'avantage de posséder une aimantation rémanente : pour l'étude des filtres, ce sont donc des structures archéologiques pouvant permettre de mettre en évidence les différences entre les données électromagnétiques filtrées et les données magnétiques cumulant différents types d'aimantation.

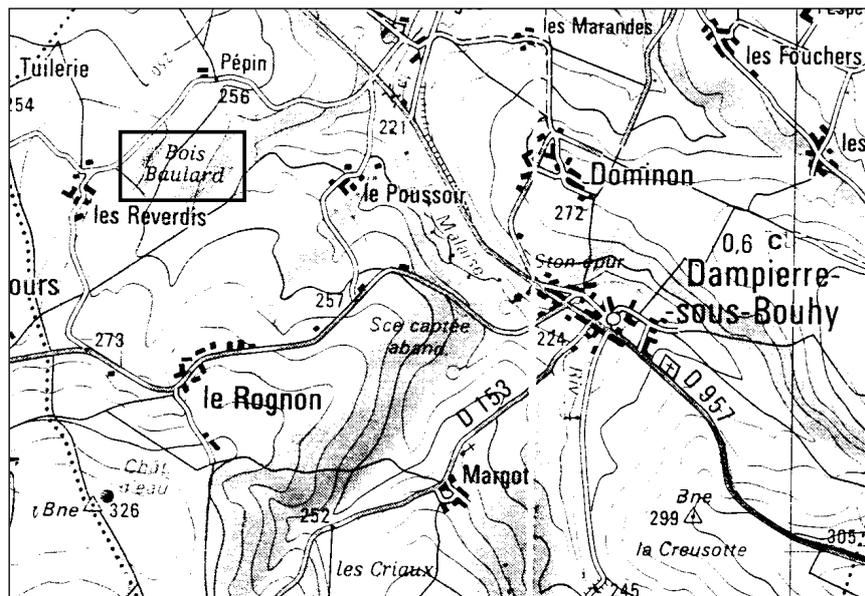


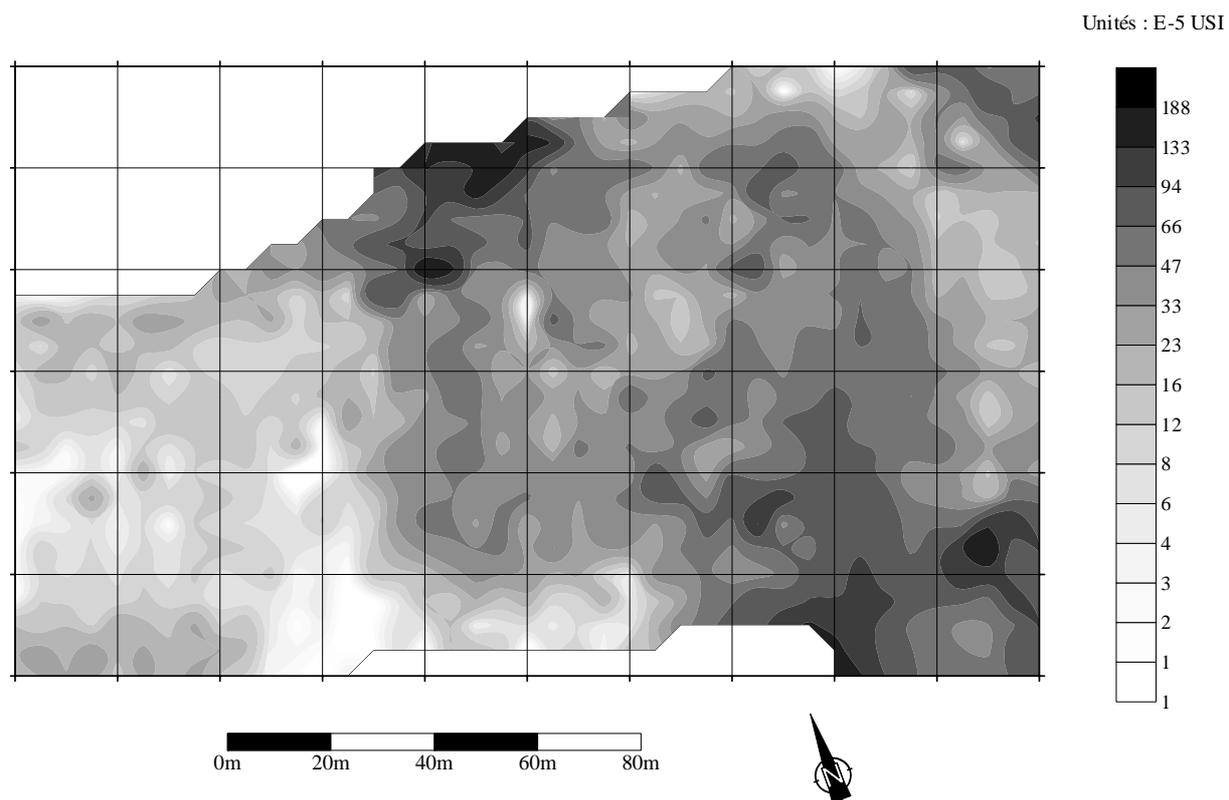
Fig. 4.22 : L'atelier de potier est situé au nord-est de la commune de Dampierre sous Bouhy, au lieu-dit "Le Chaillou", dans le bois Baulard.

## IV.2. Prospections électromagnétiques "large maille"

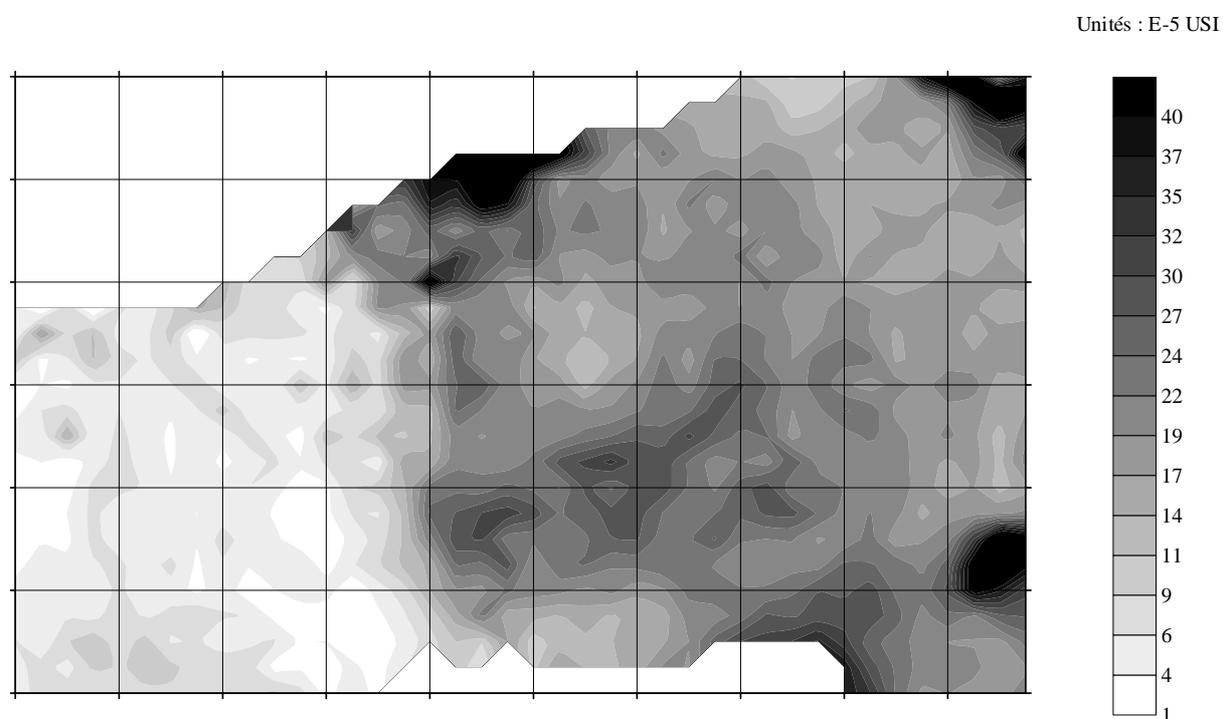
En prospection électromagnétique, une surface de 2 ha a été couverte avec le SH3 (fig. 4.23) et le DECCO (fig. 4.24). Les valeurs de susceptibilité magnétique et de viscosité magnétique sont très corrélées : les plus fortes valeurs sont concentrées au milieu de la carte sur une zone carrée d'environ 100 m de côté. La limite NS entre l'ouest et l'est est particulièrement nette bien que le terrain ne soit marqué en surface par aucune limite "physique". Le cadastre de 1836 (fig. 4.25a) nous indique l'emplacement d'une haie à cet emplacement, disparue depuis, probablement à l'époque du remembrement (fig. 4.25b). L'atelier de potier devait donc se trouver du côté est de la haie et le sol a conservé la "mémoire" de la zone d'activité. Les propriétés magnétiques du sol rendent ici bien compte de l'effet d'anthropisation du terrain. Le côté est du carré est bien délimité sur la carte du SH3 par une bande magnétique ( $90.10^{-5}$  USI) ; cette limite est moins nette sur la carte du DECCO, mais on retrouve aussi une zone de plus forte viscosité.

Le coin Nord-Ouest du carré présente une zone de très forte susceptibilité ( $\sim 180.10^{-5}$  USI) qui s'étend sur une vingtaine de mètres ; ce secteur est marqué par une grande quantité de tessons et de briques de four dans les labours. Dans le coin Sud-est, une autre anomalie, moins étendue et de plus faible susceptibilité ( $\sim 100.10^{-5}$  USI), marque peut-être la présence d'un four et peut être associée une deuxième anomalie, située au sud de la première, marquant quant à elle la présence d'un dépotoir. A l'Est de la carte, une autre anomalie, bien marquée ( $180.10^{-5}$  USI), semble aussi correspondre à l'emplacement d'un four ou d'un dépotoir mais aucun tesson ou fragment de brique n'est visible dans les labours.

Les anomalies les plus importantes se situent toutes sur les bordures des cartes de prospection qui correspondent aux limites de champ. Si la zone d'activité est nette à l'est, il est possible qu'à l'Ouest, elle s'étende au-delà du carré où le terrain présente une plus forte susceptibilité et dépasse les limites de la zone de prospection. La carte de résistivité calculée à partir de la composante en quadrature du SH3 (fig. 4.26) présente au niveau de la limite ouest du carré un gradient particulièrement marqué, passant de 30 ohm.m à 80 ohm.m. Cette limite n'est donc pas nécessairement anthropique.



*Fig. 4.23 : Prospection SH3 : susceptibilité magnétique apparente*



*Fig. 4.24 : Prospection DECCO : viscosité magnétique apparente*

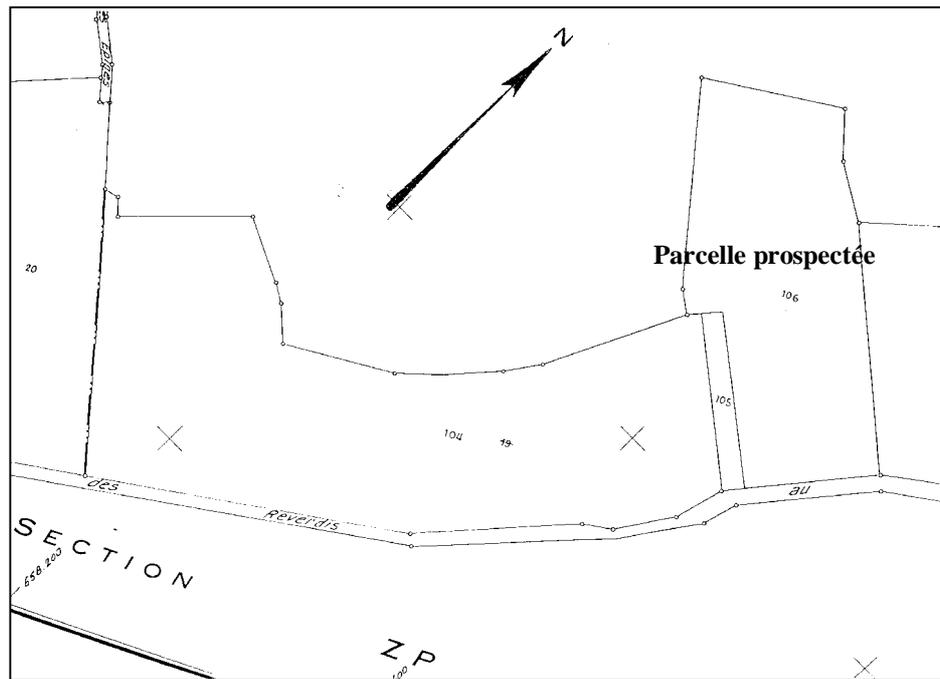


Fig. 4.25b : Cadastre moderne sur lequel la zone prospectée apparaît comme un seul tenant

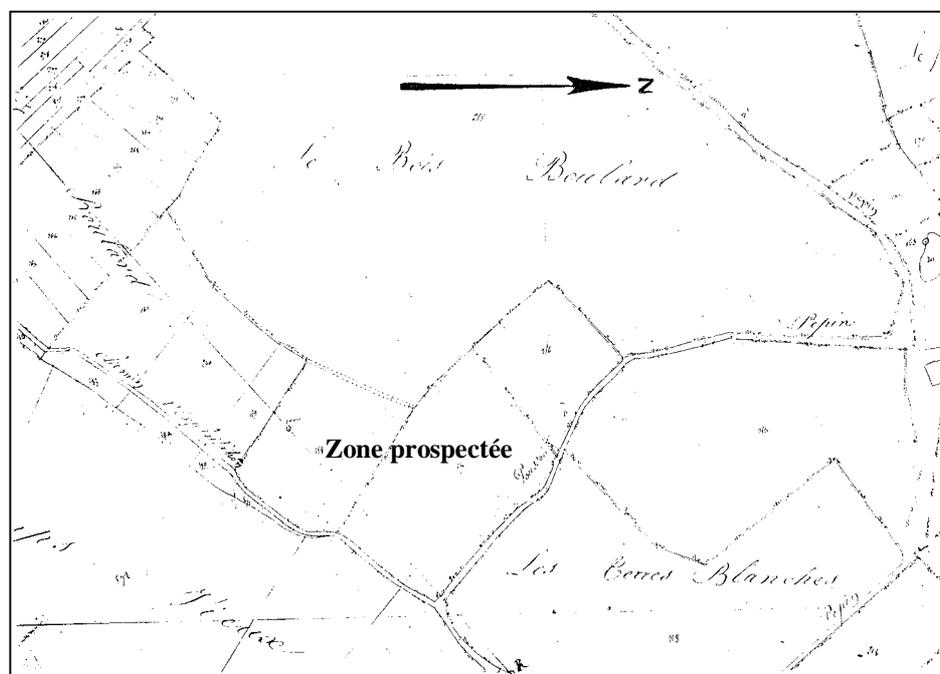
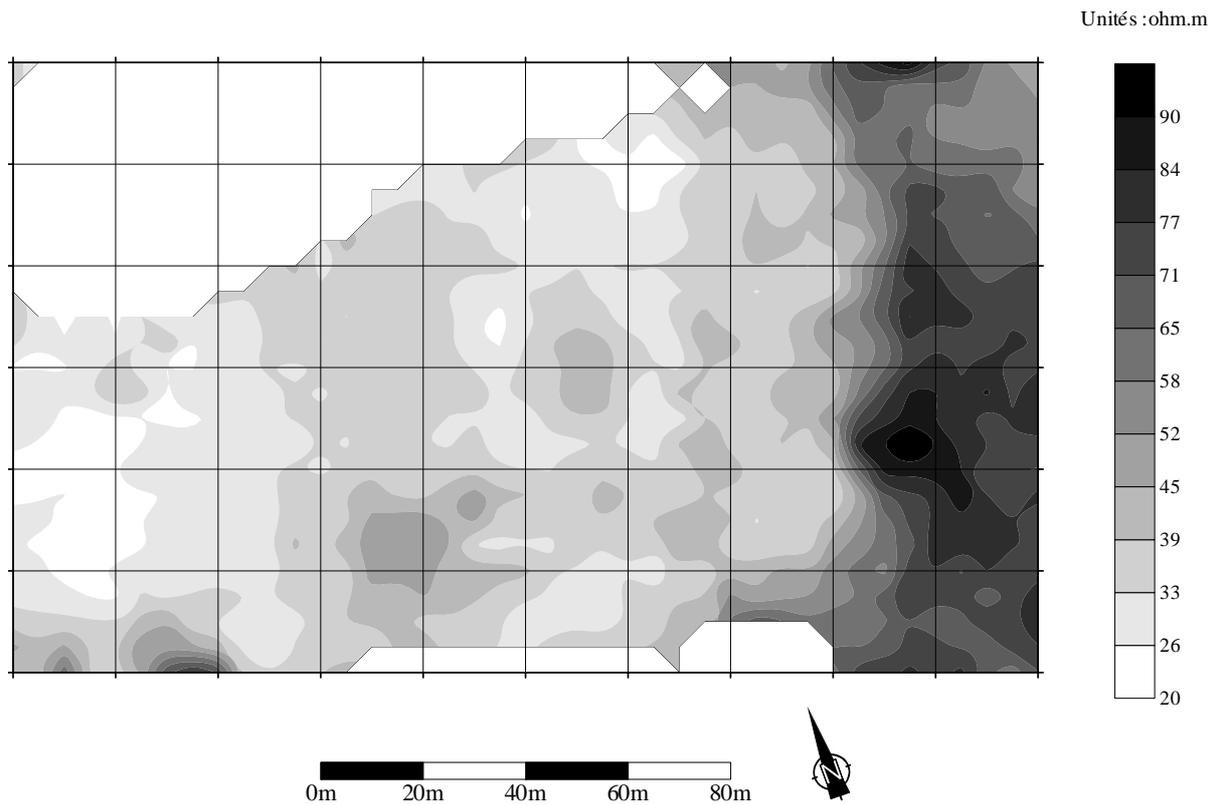


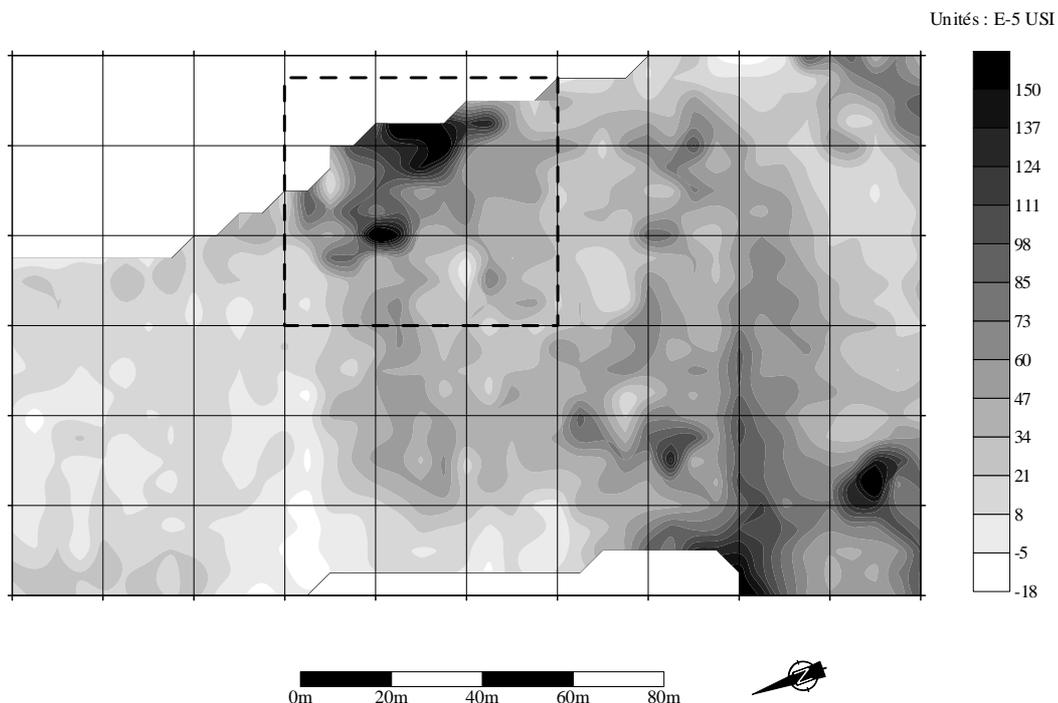
Fig. 4.25a : Cadastre de 1836 : la zone prospectée était alors divisée en deux parcelles



*Fig. 4.26 : Prospection SH3 : résistivité électrique apparente*

### IV.3. Prospections magnétique et électromagnétique à maille fine

Les prospections à maille fine ont été réalisées sur l'anomalie située au nord de la carte (fig. 4.27). Une zone de 55 m sur 60 m a été prospectée avec le SH3 avec une maille carrée de 1 m en susceptibilité (fig. 4.28a) et en résistivité (fig. 4.28b). Cette prospection permet, par rapport à l'anomalie observée en large maille, de dissocier deux pôles de fortes susceptibilités: le premier, situé en limite de champ, s'étend sur une vingtaine de mètres avec des valeurs de l'ordre de  $300.10^{-5}$  USI, sa grande extension signalant probablement la présence d'un dépotoir. La deuxième anomalie est moins étendue mais est marquée par des valeurs de susceptibilité particulièrement élevées ( $400.10^{-5}$  USI) (fig. 4.29a). Cette dernière signale vraisemblablement la présence d'un four, confirmée par une forte concentration de débris de briques à surface vitrifiée dans ce secteur. La carte de résistivité du SH3 montre en outre à cet endroit une anomalie résistante, ce qui indique la présence d'un volume significatif de matériaux rapportés. Une prospection magnétique a donc été réalisée sur cette zone avec une maille carrée de 1 m (fig. 4.29b) : l'anomalie mesurée possède une amplitude particulièrement élevée, de l'ordre de 500 nT, dans un contexte magnétique relativement calme.



*Fig. 4.27 : Localisation de la zone prospectée en maille fine  
(carte de susceptibilité magnétique obtenue avec le SH3)*

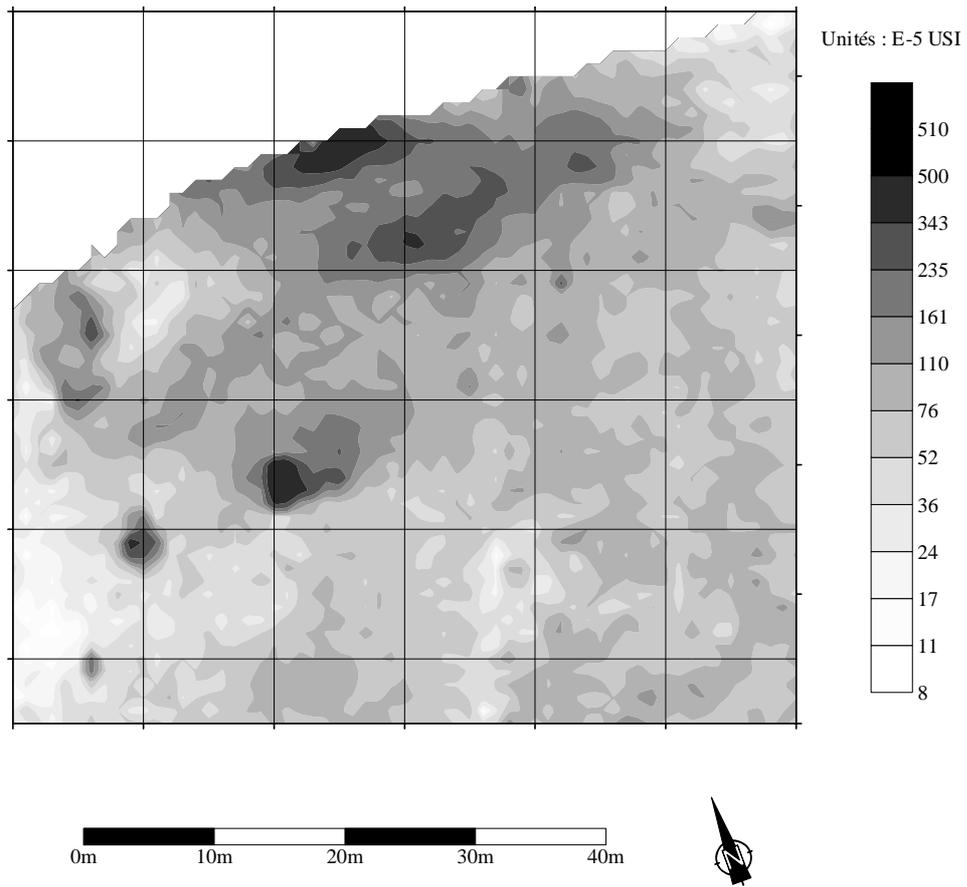


Fig. 4.28a : Prospection SH3 maille fine : susceptibilité magnétique apparente

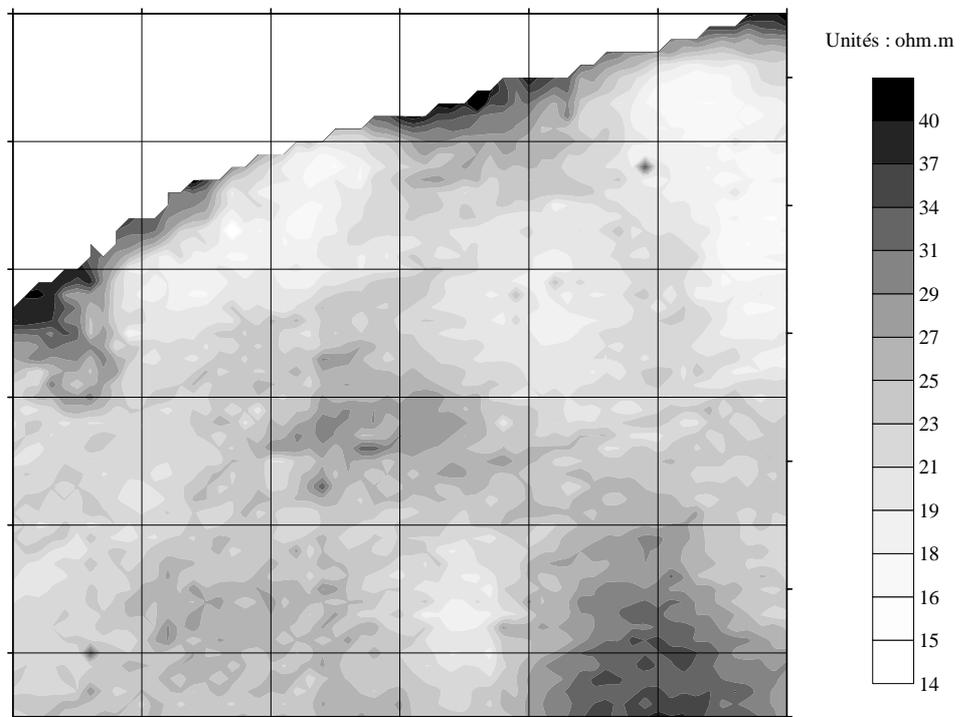


Fig. 4.28b : Prospection SH3 maille fine : résistivité électrique apparente

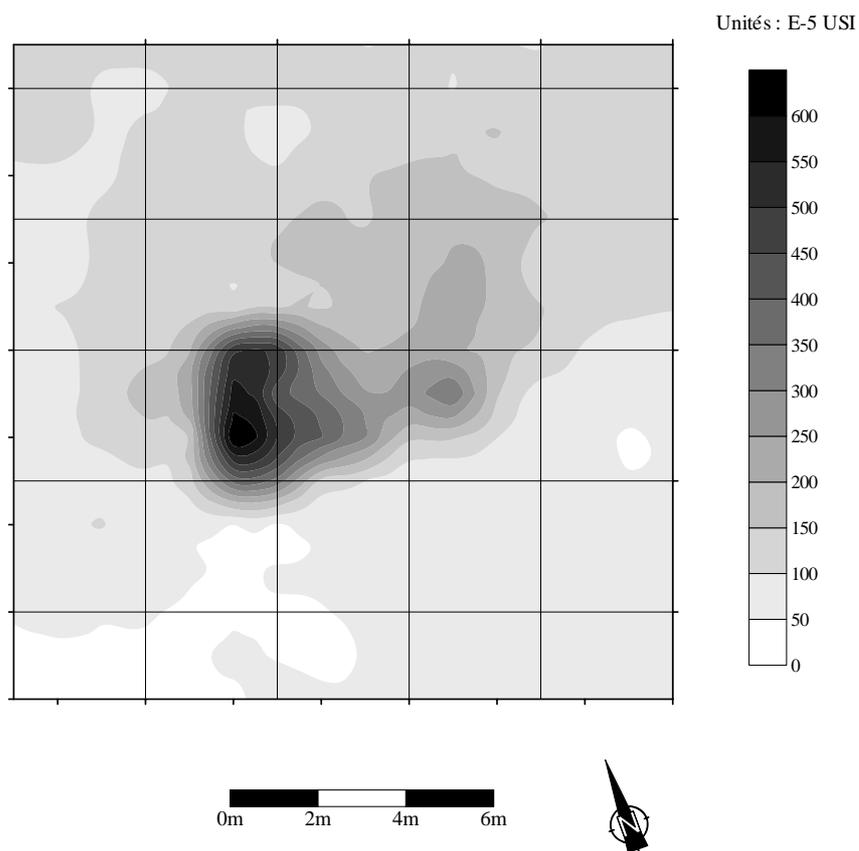


Fig. 4.29a : Détail de la prospection SH3 (composante en phase) sur la zone du four

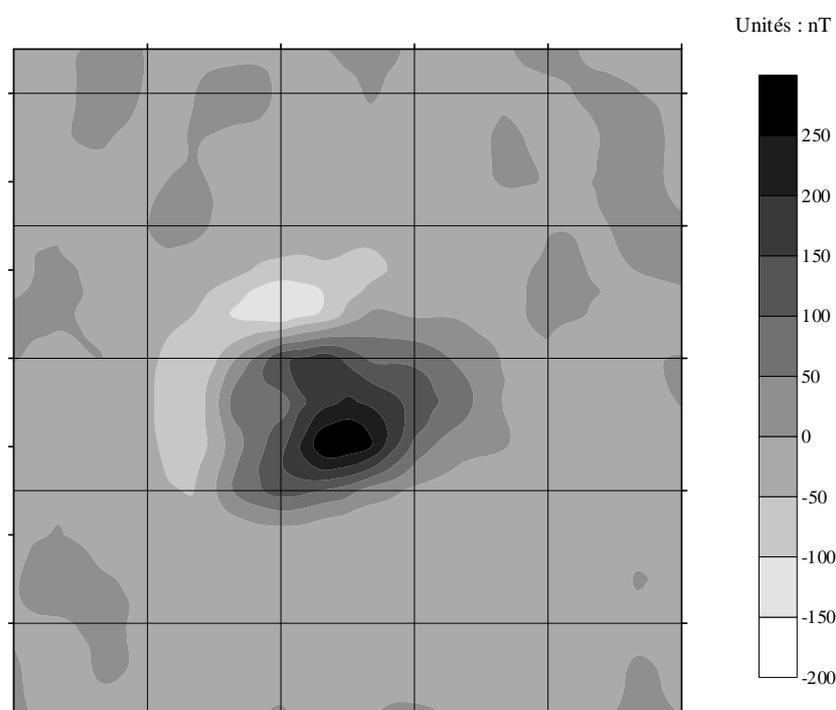


Fig. 4.29b : Prospection magnétique avec le G858 sur la zone du four

#### IV.4. Filtrage des données électromagnétiques

Le filtrage se limitera à la zone du four, ceci afin de pouvoir étudier de près les différences créés par l'aimantation rémanente du four entre les données électromagnétiques filtrées et les données magnétiques. Si une partie du four est encore en place, ce dernier doit posséder *a priori* une forte aimantation rémanente bien supérieure à l'aimantation induite, les coefficients de Koenigsberger étant habituellement compris entre 4 et 100 pour les éléments de construction des fours (Chauvin et al., 2000).

Les fonctions de transfert ont été calculées à partir des trois positions de dipôle suivantes :

- a) un dipôle à 20 cm de profondeur (fig. 4.30a)
- b) un dipôle à 50 cm de profondeur (fig. 4.30b)
- c) un dipôle à 70 cm de profondeur (profondeur d'investigation maximale du SH3) (fig. 4.30c)

Quelle que soit la position du dipôle, les valeurs obtenues pour les données filtrées sont beaucoup plus faibles que les données magnétiques. Les labours ont généralement une profondeur d'environ 30 cm : le cas (a) supposerait que les anomalies ont pour cause des remontées de matériel par les labours, ce n'est pas le cas et ceci explique des valeurs particulièrement faibles. Le cas (b) entraîne une légère augmentation de l'anomalie mais pour le cas (c) elle reste toujours beaucoup plus faible que l'anomalie magnétique initiale : si l'on interprète celle-ci par déconvolution d'Euler l'anomalie obtenue par la prospection magnétique avec l'indice structural  $N=2$  (Desvignes et al., 1999), la profondeur du four doit se trouver centrée aux environs de 47 cm. La source de l'anomalie magnétique se trouve donc dans la gamme de profondeur du SH3 et il est possible de cartographier l'effet de l'aimantation rémanente de l'anomalie en soustrayant les données électromagnétiques filtrées aux données magnétiques (fig. 4.31a, b et c).

Si l'on applique à nouveau la déconvolution d'Euler (avec  $N=2$ ) à l'anomalie due à la rémanente, on obtient les résultats suivants :

- a)  $z = 0,45$  m pour un dipôle à 0,20 m
- b)  $z = 0,47$  m pour un dipôle à 0,50 m
- c)  $z = 0,42$  m pour un dipôle à 0,70 m

La faible différence entre ces trois cas est logique puisque l'anomalie due à l'aimantation induite est faible devant celle due à la rémanente. Ces résultats sont par ailleurs

très proches de celui obtenu pour les données magnétiques. Ceci confirme que les différences observées entre les données magnétiques et les données électromagnétiques filtrées est effectivement due à l'aimantation rémanente et non à la différence de profondeur d'investigation des appareils, puisque la source d'aimantation totale et la source d'aimantation rémanente sont à la même profondeur.

On peut, à partir de là, déterminer un coefficient de Koenigsberger moyen pour le four : dans le cas d'un dipôle à 0,50 m de profondeur, l'écart type de l'anomalie due à l'aimantation induite est de 7,37 ; en la soustrayant à l'anomalie magnétique, l'écart type de l'anomalie due à l'aimantation rémanente est de 38,9. Le coefficient global de Koenigsberger est de 5,3 et se trouve donc dans la gamme de valeurs admise pour les éléments de construction de four.

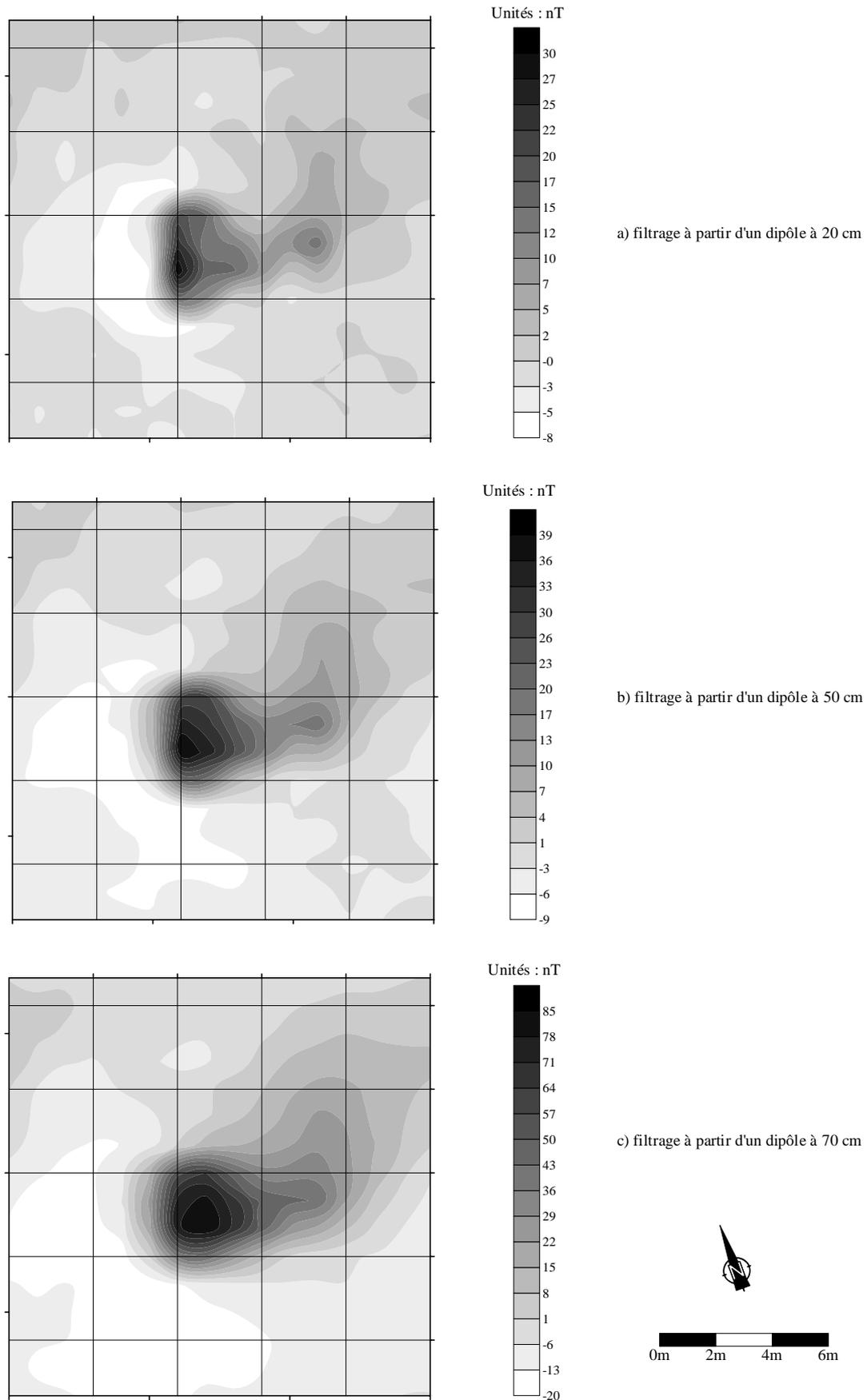


Fig. 4.30 : Filtrage des données SH3 sur le four

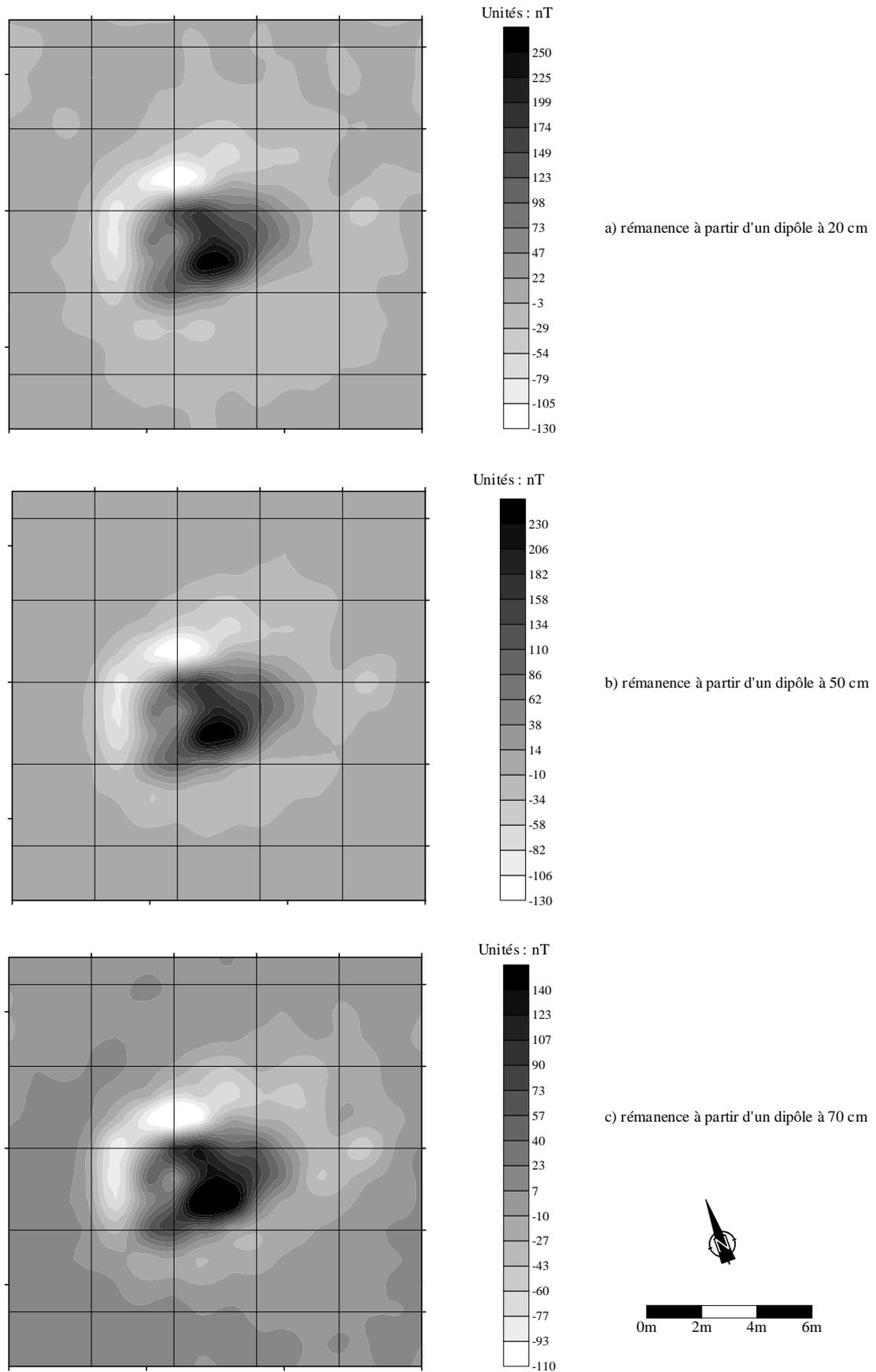


Fig. 4.31 : Cartographie de l'aimantation rémanente de l'anomalie du four

## IV.5. Conclusion

Le site de Dampierre sous Bouhy est une illustration intéressante de l'influence de l'anthropisation sur les propriétés magnétiques des sols. Outre les différentes structures détectées (fours et dépotoirs), la zone d'occupation se caractérise par une susceptibilité moyenne plus élevée que la partie du champ qui n'a pas connu d'occupation. A ce jour, ce site n'a pas fait l'objet de fouilles ; la période du XVII<sup>e</sup> siècle a été proposée d'après les échantillons de céramique prélevés dans les labours et il est par conséquent difficile d'évaluer sur quelle durée l'atelier est resté en activité.

Ces prospections ont néanmoins permis de mettre en évidence un des principaux intérêts du filtrage linéaire des données électromagnétiques, à savoir la caractérisation des différents types d'aimantation présents dans le sol.

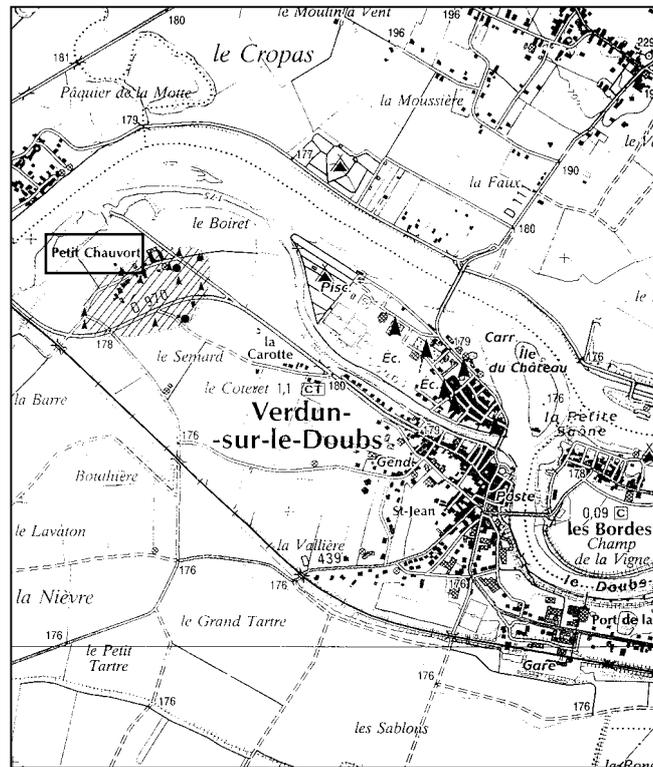
## V. Le site de Verdun sur le Doubs (71) : un habitat de l'Age du Fer

### V.1.Introduction

Ce site de l'Age du Fer a été découvert dans les années 70 (Guillot, 1970) ; il est localisé au hameau du Petit-Chauvort sur la commune de Verdun sur le Doubs (71) à environ 1,5 km en aval de la confluence de la Saône et du Doubs (fig. 4.32). Le hameau occupe une légère éminence où des implantations protohistoriques ont été attestées en plusieurs endroits. Les prospections géophysiques font suite à deux campagnes de fouilles, réalisées dans une prairie, qui ont amené à la découverte d'habitats semi-enterrés et de fosses contenant des terres cuites et des scories, et dont les premiers éléments apparaissaient à partir de 50 cm de profondeur (Barral, 1998).

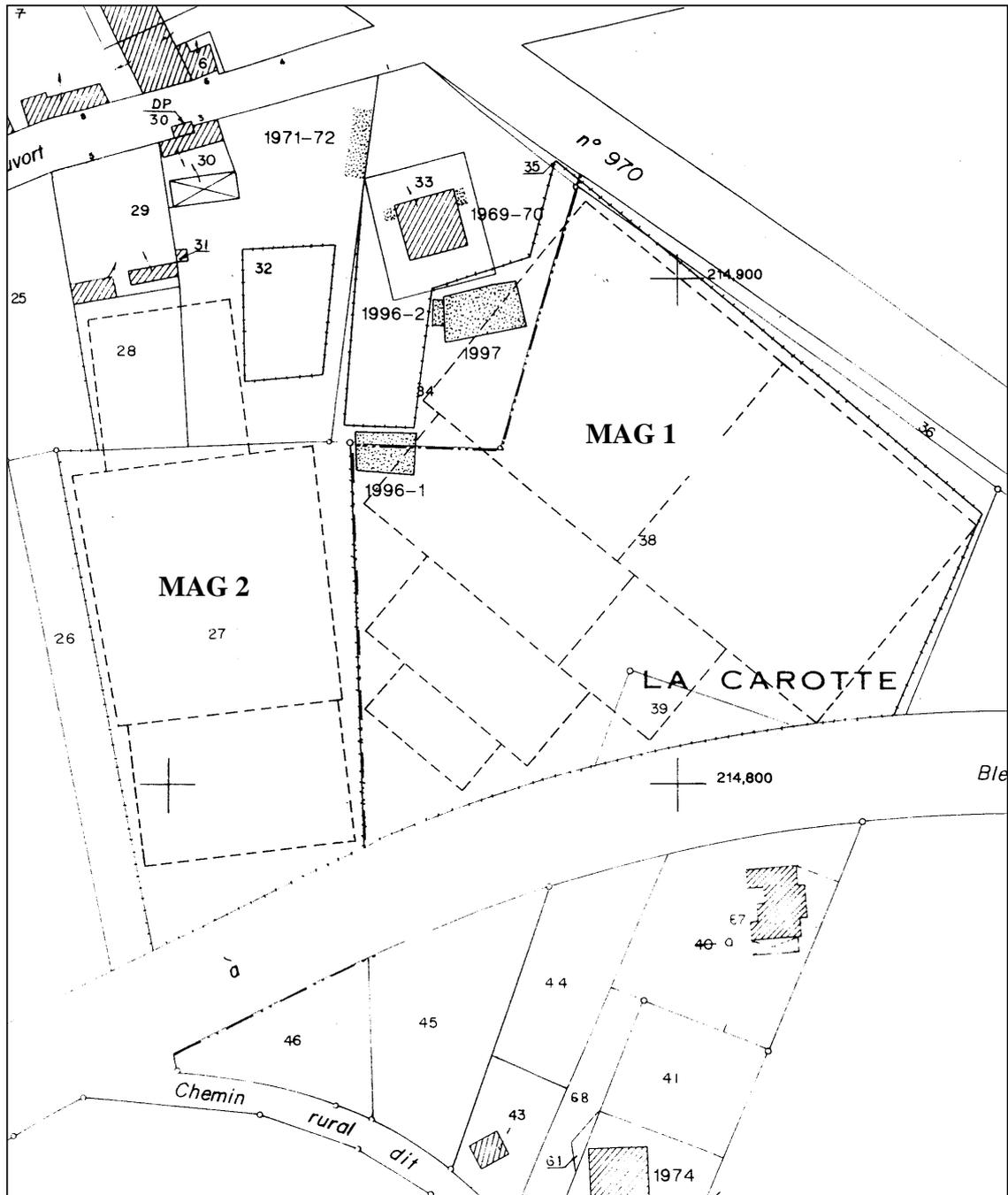
Cette campagne de prospection visait à étudier l'organisation de l'habitat dans la prairie où les sondages archéologiques avaient été réalisés (fig. 4.33). Le site du "Petit Chauvort" se trouve dans une zone alluviale formée de limons peu argileux, avec parfois des lits de sable ou de galets intercalés. Dans ce contexte géologique relativement homogène, une prospection magnétique a été réalisée avec le gradiomètre G858 de Geometrics sur une surface d'environ 2 ha. Une prospection électromagnétique a été réalisée sur une surface plus restreinte : ¼ ha a été couvert avec le SH3 et un carré de 20 m sur 20 m avec le CS150 à

l'emplacement de l'un des sondages prévus pour la campagne 1998 qui a suivi les prospections géophysiques. Il s'agissait, pour le CS150, du premier essai en contexte archéologique.



*Fig. 4.32 : Localisation de l'habitat gaulois au lieu-dit "Le Petit Chauvort", au Nord-Est de la commune de Verdun sur le Doubs.*

*Les traits hachurés signalent l'emprise du site.*



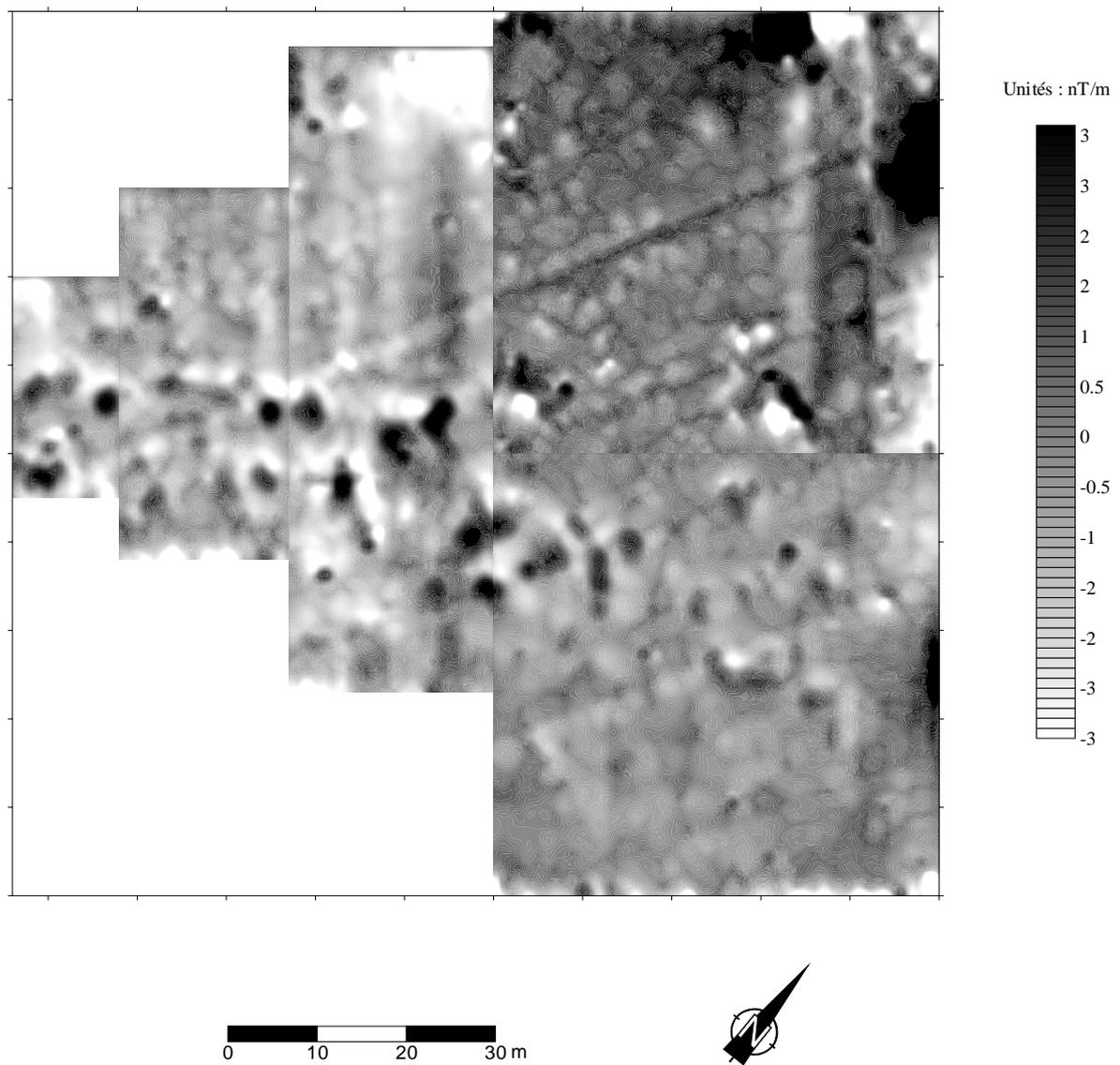
*Fig. 4.33 : Localisation des sondages archéologiques 1996 et 1997 (zones en semis de points), et des prospections magnétiques MAG1 et MAG2*

## V.2. Prospection magnétique

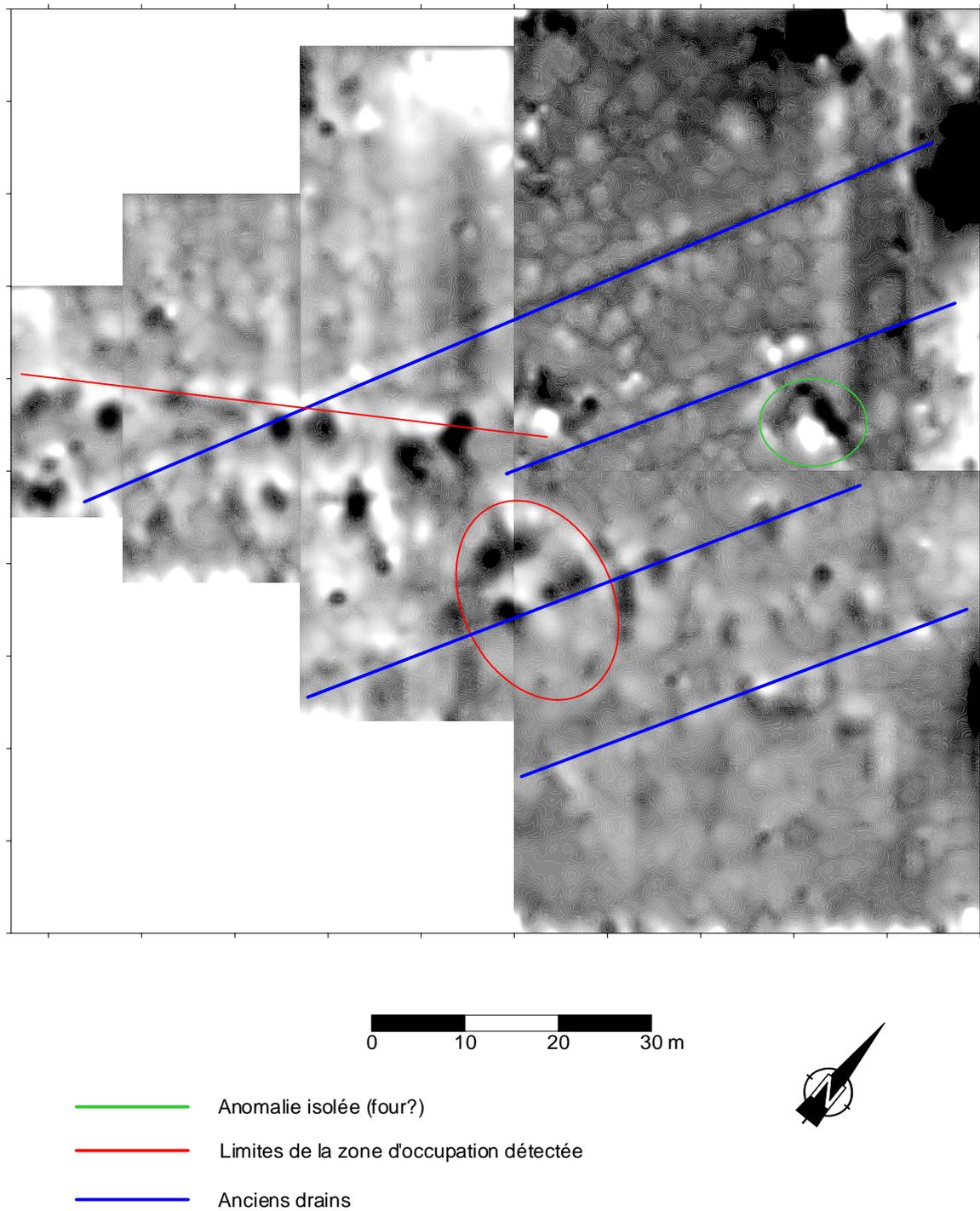
La prospection magnétique a été réalisée sur deux prairies attenantes couvrant une surface d'environ 2 ha (MAG1 et MAG 2 sur la figure 4.33). Les grandes lignes traversant en biais la carte MAG1 sont dues à d'anciens drains d'irrigation dont la trace est encore visible sur le terrain. Les variations mesurées sont en moyenne relativement faibles ( $\pm 6$  nT/m).

Une forte concentration d'anomalies assez peu étendues est visible au sud de la carte MAG1 (fig. 4.34a et 4.34b) et indique certainement une zone d'occupation dans un secteur marqué sur le terrain par une légère éminence topographique. Ces anomalies peuvent avoir pour origine le même type de structures archéologiques que celles fouillées lors des campagnes précédentes : des fosses ou des habitats semi-enterrés. La limite nord de cette zone est bien marquée au nord par un alignement d'anomalies d'une amplitude relativement forte ( $\pm 4$  nT/m). La limite à l'est est marquée par une anomalie de forme ovalaire ; au-delà de cette dernière, seules quelques anomalies de moindre amplitude sont encore visibles mais elles ne forment pas un ensemble cohérent pouvant faire penser, comme à l'ouest, à une zone d'occupation. Les limites sud et est s'étendent au-delà de la zone prospectée.

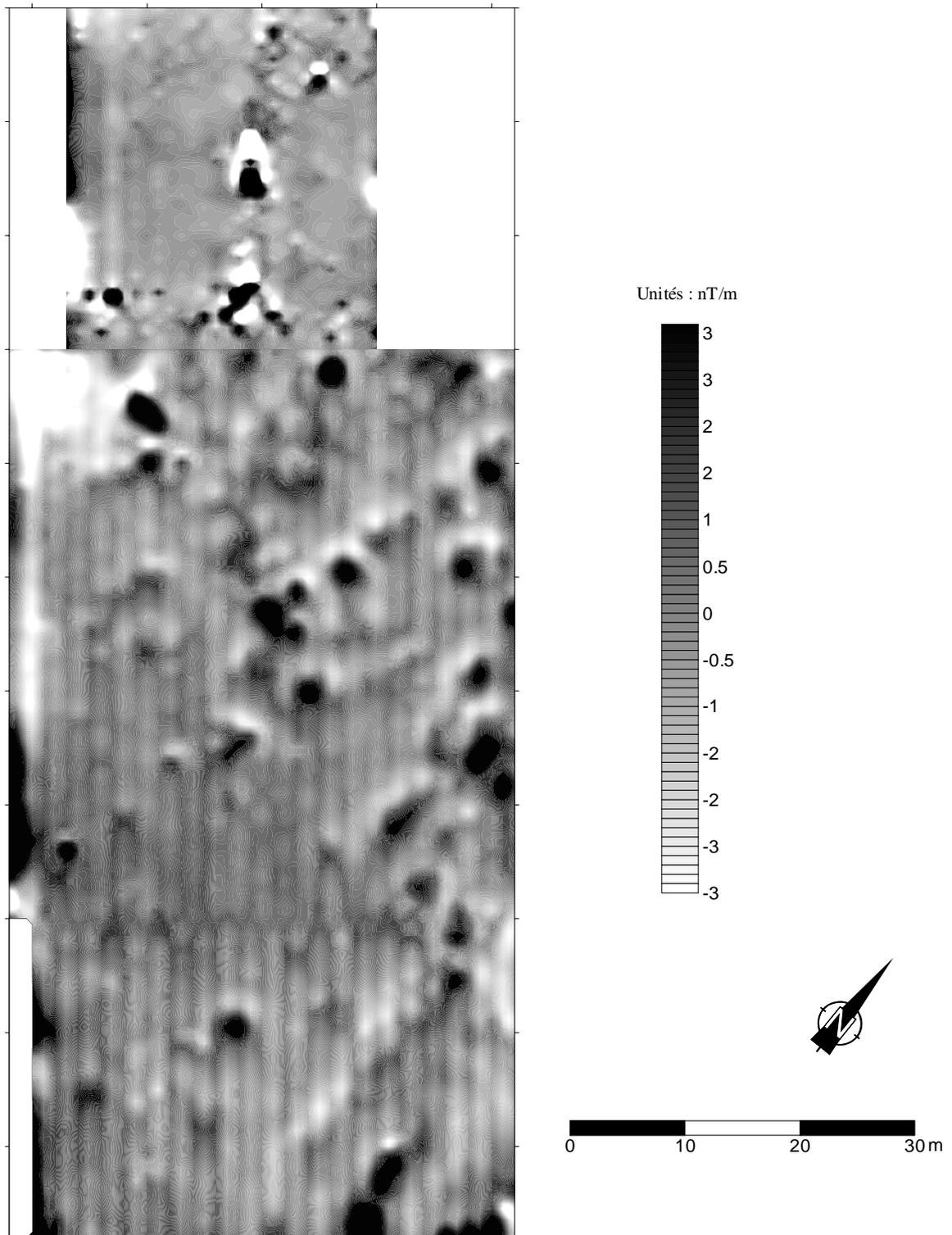
Cette zone d'occupation n'est plus visible sur la carte MAG2 (fig. 4.35a et 4.35b). La limite est de cette zone doit donc se trouver dans les portions de terrain situées en bordure de champ, et non prospectée avec le gradiomètre. Les fortes anomalies présentes au nord de la carte MAG2 signalent deux limites perpendiculaires du parcellaire qui n'existent plus aujourd'hui mais étaient visibles sur le cadastre de 1978. Les autres anomalies au sud indiquent plusieurs limites perpendiculaires entre elles ; il est toutefois peu probable que ces limites marquent une organisation remontant à l'Age du Fer.



*Fig. 4.34a : Prospection au gradiomètre au Césium G858 : carte MAG1*



*Fig. 4.34b : Prospection au gradiomètre au Césium G858 : carte MAG1 interprétée*



*Fig. 4.35a : Prospection au gradiomètre au césium : carte MAG2*

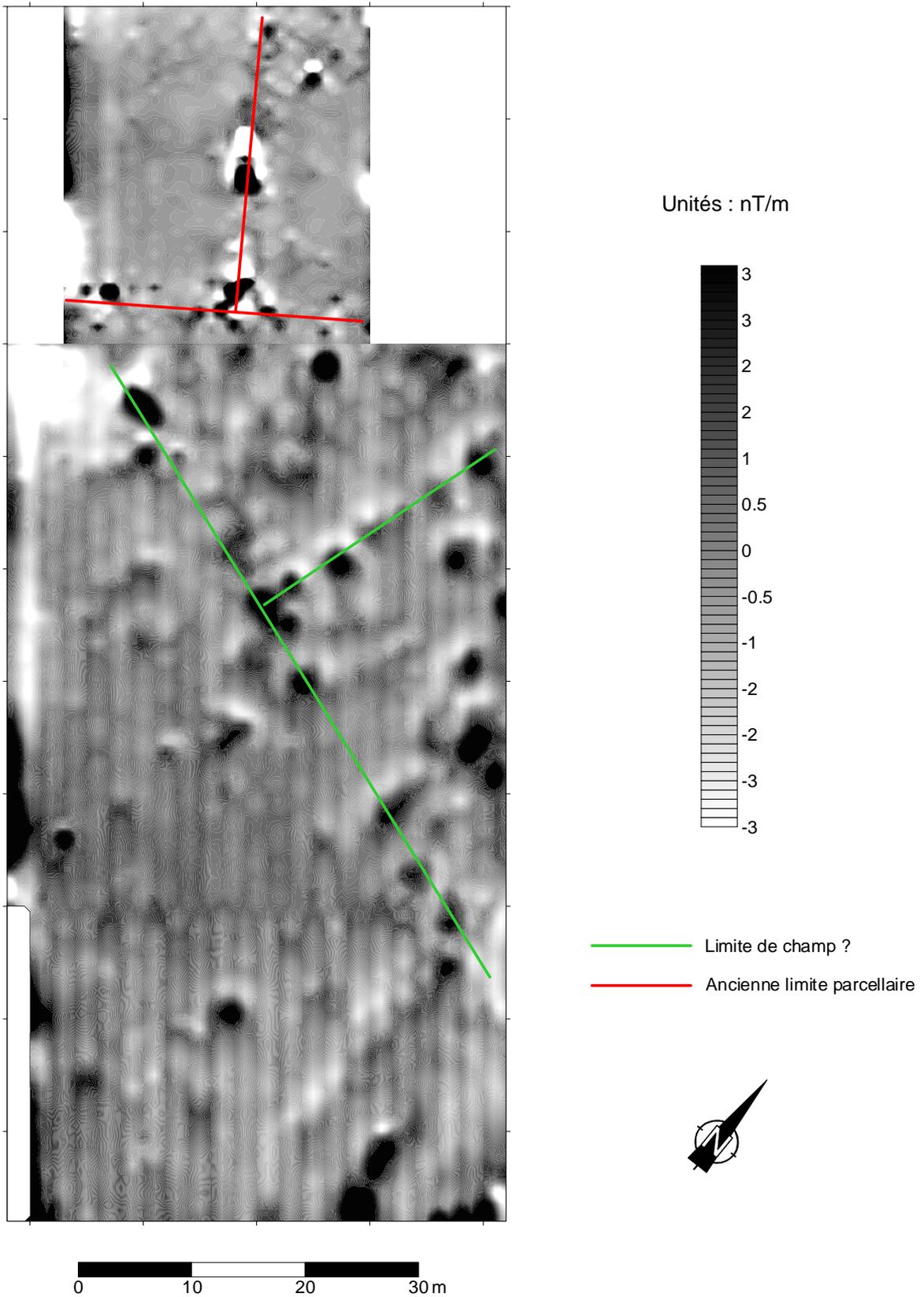


Fig. 4.35b : Carte MAG2 : données interprétées

### V.3. Prospections électromagnétiques

#### V.3.1. Prospection SH3

Le SH3 a été utilisé dans le secteur situé à l'est de la zone d'occupation repérée en magnétisme, et où apparaissaient quelques anomalies de faible amplitude (carte EM1 sur la figure 4.36). Ces même anomalies se retrouvent sur la carte EM1 ; signalées par une susceptibilité apparente forte ( $\sim 100 \cdot 10^{-5}$  USI), elles ne forment pas, cependant, un ensemble cohérent marquant une occupation relativement dense de ce secteur. Leur origine peut être néanmoins anthropique et correspondre à des fosses isolées.

Par manque d'anomalies significatives, le filtrage des données électromagnétiques SH3 n'a pas été réalisé sur cette zone.

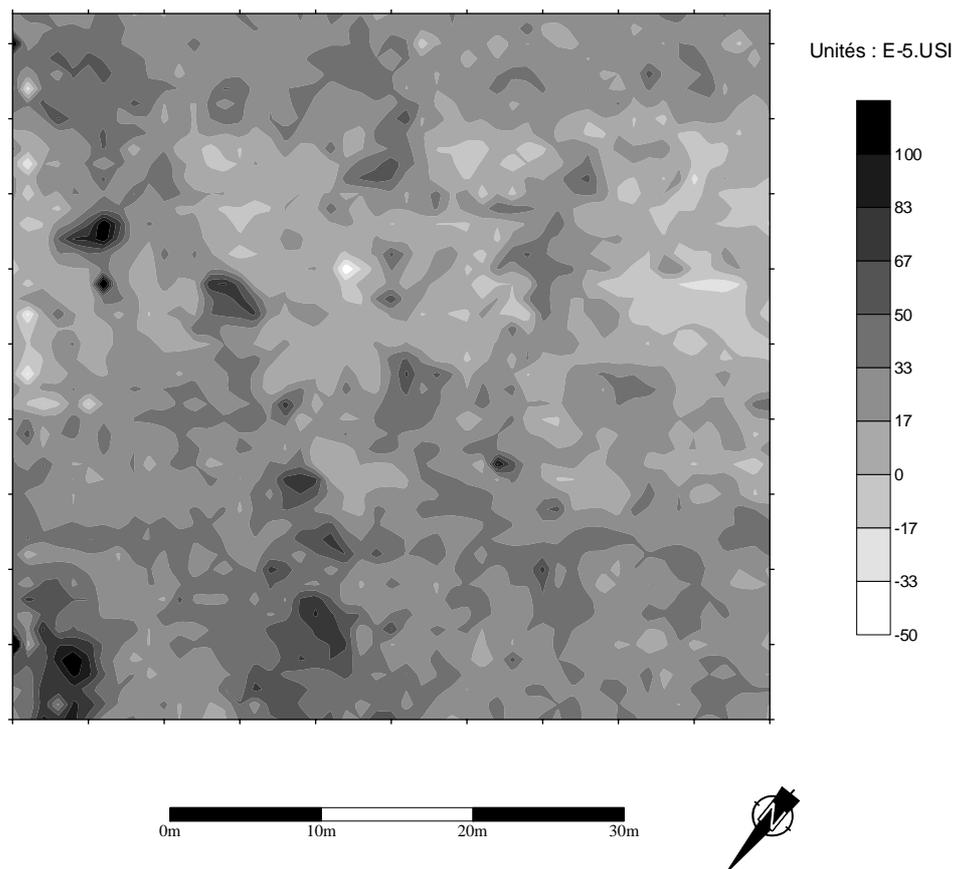


Fig. 4.36 : Prospection SH3 : susceptibilité magnétique apparente

### V.3.2. Prospection CS150

Le site du Petit-Chauvort a servi de terrain d'expérimentation pour le premier prototype du CS150. Un carré de 20×20 m<sup>2</sup> a été implanté à partir de la carte magnétique sur une zone présentant des anomalies bien caractérisées (fig. 4.37a et 4.37b). La carte magnétique est présentée ici en champ total. Les deux cartes obtenues sont très proches : une anomalie centrale s'étend sur 5 m environ dans le sens nord-sud avec un maximum de 18 nT en magnétisme et  $100 \cdot 10^{-5}$  USI en électromagnétisme. Lors de la campagne archéologique de 1998 (Barral, 1999), un sondage a été réalisé à l'aplomb de cette anomalie : la fouille a révélé trois fosses correspondant chacune à une zone de plus fortes valeurs de l'anomalie (fig. 4.38a et 4.38b). Deux anomalies plus petites sont aussi visibles au sud sur les deux cartes mais sont situées hors de l'emprise du sondage.

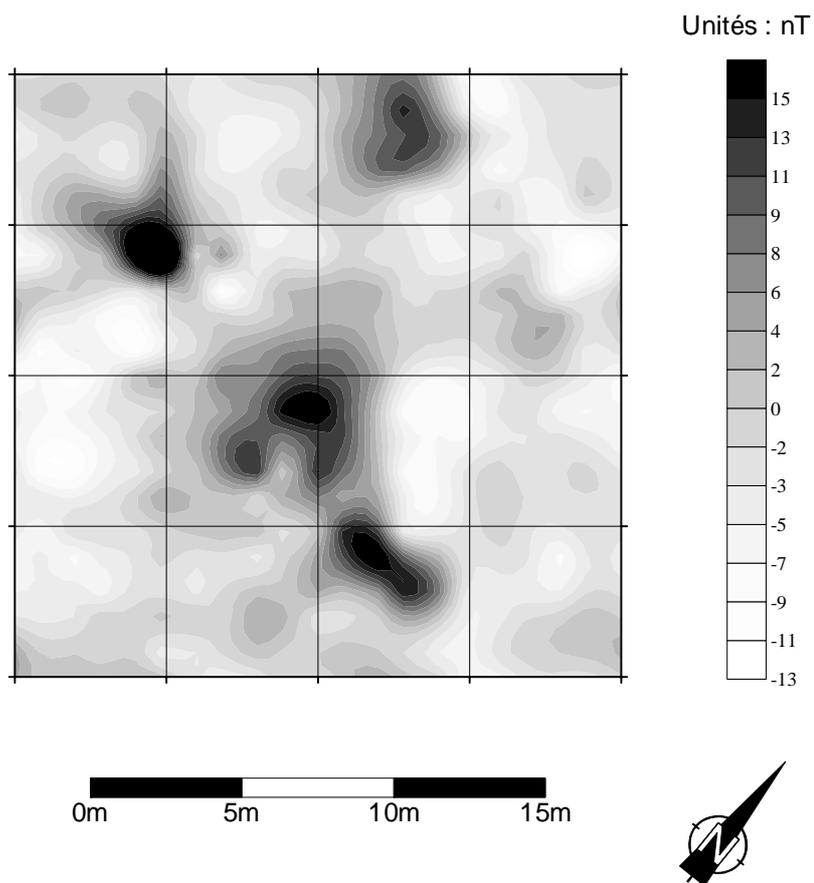


Fig. 4.37a : Détail de la prospection magnétique (champ total)

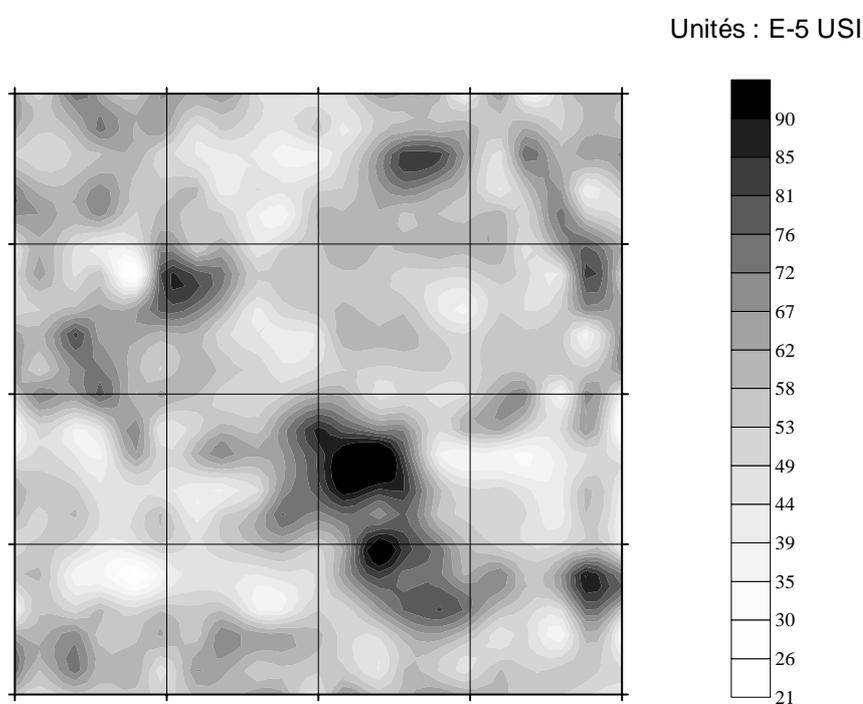


Fig. 4.37b : Prospection CS150 (4,4kHz) : susceptibilité magnétique apparente

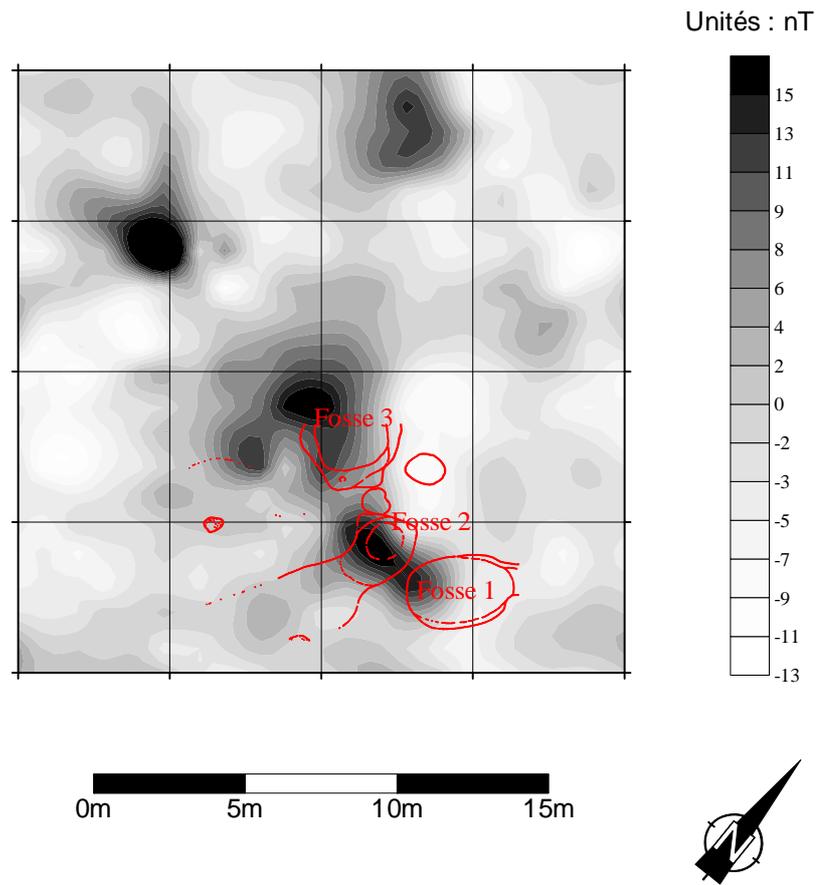


Fig. 4.38a : Superposition du plan de fouille et de la carte magnétique

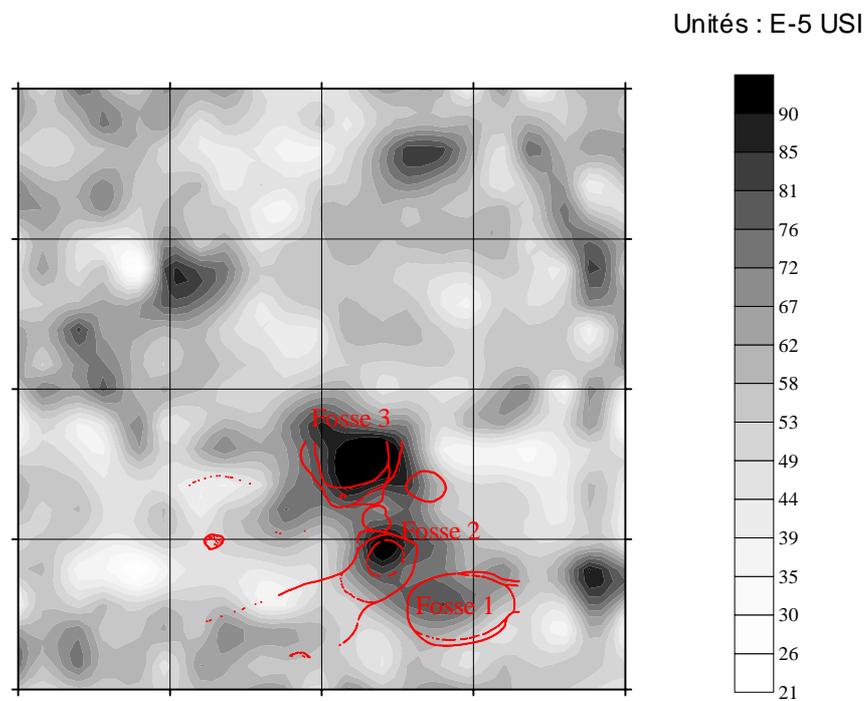


Fig. 4.38b : Superposition du plan de fouille et de la prospection CS150

Plusieurs filtrages ont été réalisés sur les données électromagnétiques ; la fonction de transfert est calculée dans le cas d'un seul dipôle, placé chaque fois à une profondeur différente (tableau 4.4 ; fig. 4.39a, b, c, d et e).

Y-a-t-il correspondance de profondeur de source entre l'anomalie magnétique et l'anomalie électromagnétique ?

On ne peut pas répondre de façon univoque à cette question. Par contre, si on ne retrouve pas la même anomalie pour une profondeur vraisemblable de dipôle définissant le filtre et que l'anomalie magnétique restante obtenue après soustraction de l'anomalie résultante du filtrage corresponde à une source plus profonde que l'anomalie brute, la réponse à cette question sera négative.

CS150 (4.4 kHz)	Minimum (nT)	Maximum (nT)	Ecart-type
Données M	-13,74	35,89	5,34
Données EM filtrées : 1 dipôle à 10 cm	-11	7,18	3,12
Données EM filtrées : 1 dipôle à 20 cm	-7,32	14,11	3,41
Données EM filtrées : 1 dipôle à 30 cm	-10,27	18,94	4,80
Données EM filtrées : 1 dipôle à 35 cm	-12,62	22,53	5,87
Données EM filtrées : 1 dipôle à 40 cm	-15,3	26,5	7,09

*Tableau 4.4 : Caractéristiques des données obtenues sur le site de Verdun sur le Doubs (carré 20×20 m<sup>2</sup>) en M et en EM pour le CS150 (4,4 kHz) après filtrage.*

Excepté dans le cas d'un dipôle à 10 cm, le filtrage linéaire sur les données EM a tendance à lisser les données et les trois "pôles" magnétiques caractérisant l'anomalie des données initiales ne sont plus distincts après filtrage. Cet effet s'amplifie au fur et à mesure que la profondeur du dipôle augmente. Ceci suggère que l'anomalie magnétique initiale a des sources pour partie superficielles. Le cas d'un dipôle situé à 35 cm de profondeur donne le

résultat le plus intéressant, avec un maximum, un minimum et un écart-type relativement proche des données magnétiques brutes. Ce résultat est en accord avec les données archéologiques où les premiers niveaux d'occupation sont situés entre 30 et 40 cm : quoique les fosses 1, 2 et 3 atteignent respectivement une profondeur de 1,50 m, 0,50 m et 2,20 m (deux d'entre elles ne sont pas, par conséquent, détectables dans leur ensemble par le CS150), la fouille a montré que les couches les plus riches en matériel archéologique se trouvent dans le comblement supérieur de ces fosses à moins d'un mètre de profondeur. Un calcul de la profondeur des sources d'anomalies magnétiques retrouve cette gamme de profondeur : si on calcule la profondeur de l'anomalie magnétique brute par déconvolution d'Euler, on obtient comme profondeur de la source 0,25 m pour un indice structural de 1, et 0,60 m pour un indice structural de 2 ; on peut retrouver la valeur de 0,35 m pour un indice structural de 1,3, valeur tout à fait vraisemblable pour cet indice. Ceci explique la bonne corrélation entre les données magnétiques et les données électromagnétiques filtrées, même si les fosses elles-mêmes ont une grande extension en profondeur.

On doit aussi poser la question de l'existence éventuelle d'une aimantation visqueuse, la présence d'une aimantation thermorémanente étant *a priori* très peu probable pour ce type de structure. Pour cela, on recherche s'il existe un indice structural ayant une valeur vraisemblable (comprise entre 1 et 2,3 environ) pour lequel les sources de l'anomalie brute, de l'anomalie filtrée et la profondeur du dipôle définissant le filtre coïncident. Si l'anomalie brute est supérieure à l'anomalie filtrée, la différence peut très vraisemblablement être interprétée comme due à l'aimantation visqueuse, mais il est difficile de mettre en évidence l'éventuelle présence d'une aimantation visqueuse dont l'effet est beaucoup moins important que dans celui d'une aimantation rémanente. L'estimation de la profondeur de la source magnétique avec une déconvolution d'Euler peut en outre varier de manière significative suivant la taille de la fenêtre sélectionnée.

Dans le cas d'un filtrage à partir d'un dipôle à 0,20 m de profondeur, on obtient par déconvolution d'Euler pour l'anomalie filtrée une profondeur de 0,32 m, la même que pour l'anomalie brute, pour un même indice structural de 1,1. Les données magnétiques ont un écart-type 1,5 fois supérieur à celui des données électromagnétiques filtrées, il constitue un ordre de grandeur tout à fait plausible pour l'aimantation visqueuse d'une structure en place depuis 2000 ans.

Il est possible de calculer le coefficient de viscosité à partir de la relation correspondant à la théorie des grains monodomaines :

$$\chi(t) = \chi_{ac} \times \left[ 1 + s \times \ln \left( t \times \frac{\omega}{\pi} \right) \right]$$

Les données expérimentales nous donnent un rapport  $(\chi(t)/\chi_{ac})$  égal à 1,5 pour  $t=2000$ ans. De là, on déduit  $s=0,034$ . Le coefficient de viscosité peut alors être calculé par la relation :

$$\frac{\chi_q}{\chi_p} = \frac{\pi}{2} \times s = 5,34\%$$

Ce coefficient de viscosité est en accord avec les valeurs déjà publiées pour ce dernier (Mullins, 1974 ; Dabas, 1992). La présence d'une aimantation visqueuse est très importante pour l'interprétation de l'anomalie puisqu'elle prouve que la structure, source de l'anomalie magnétique, est en place.

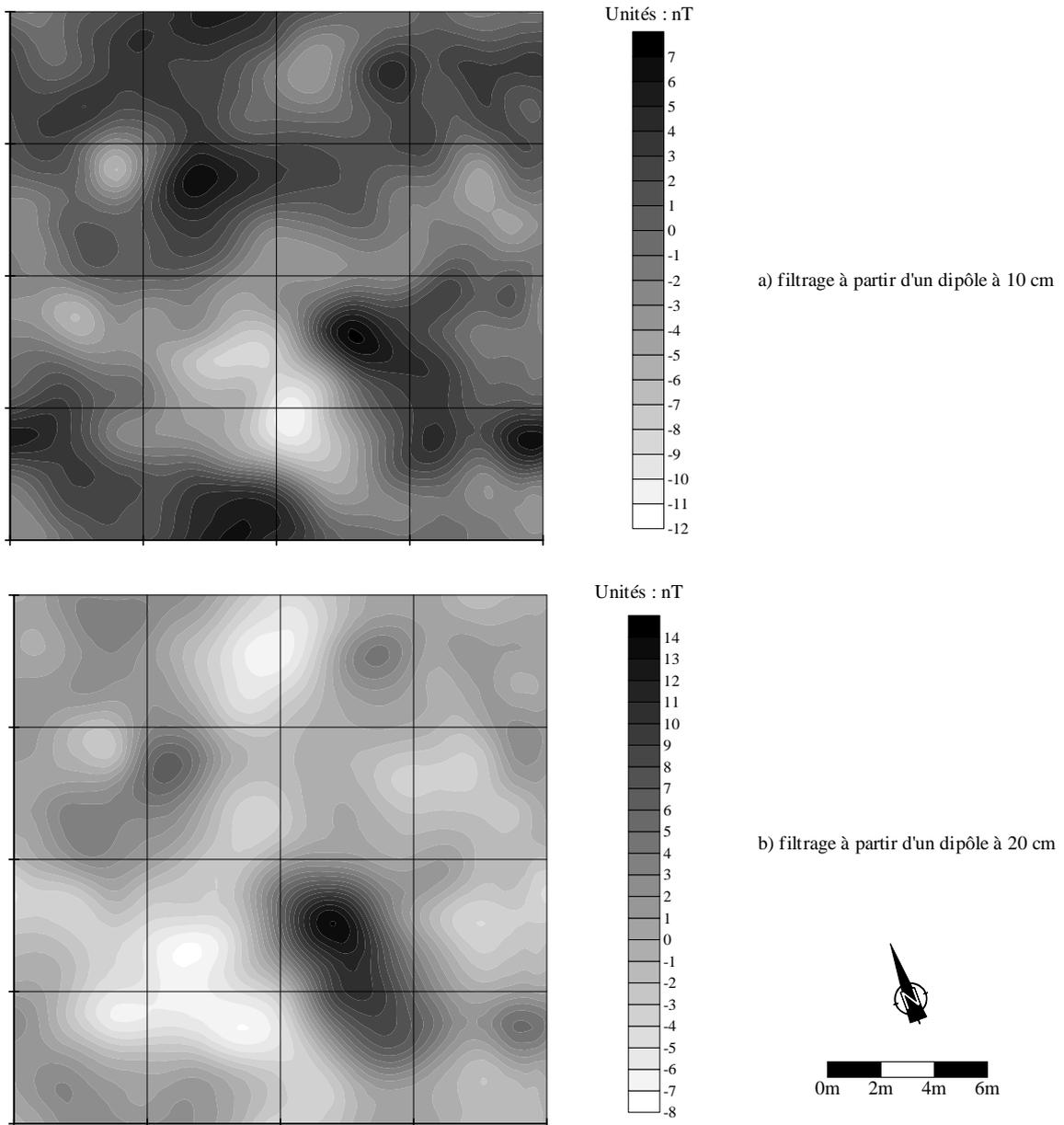


Fig. 4.39a et b : Filtrage des données CS150

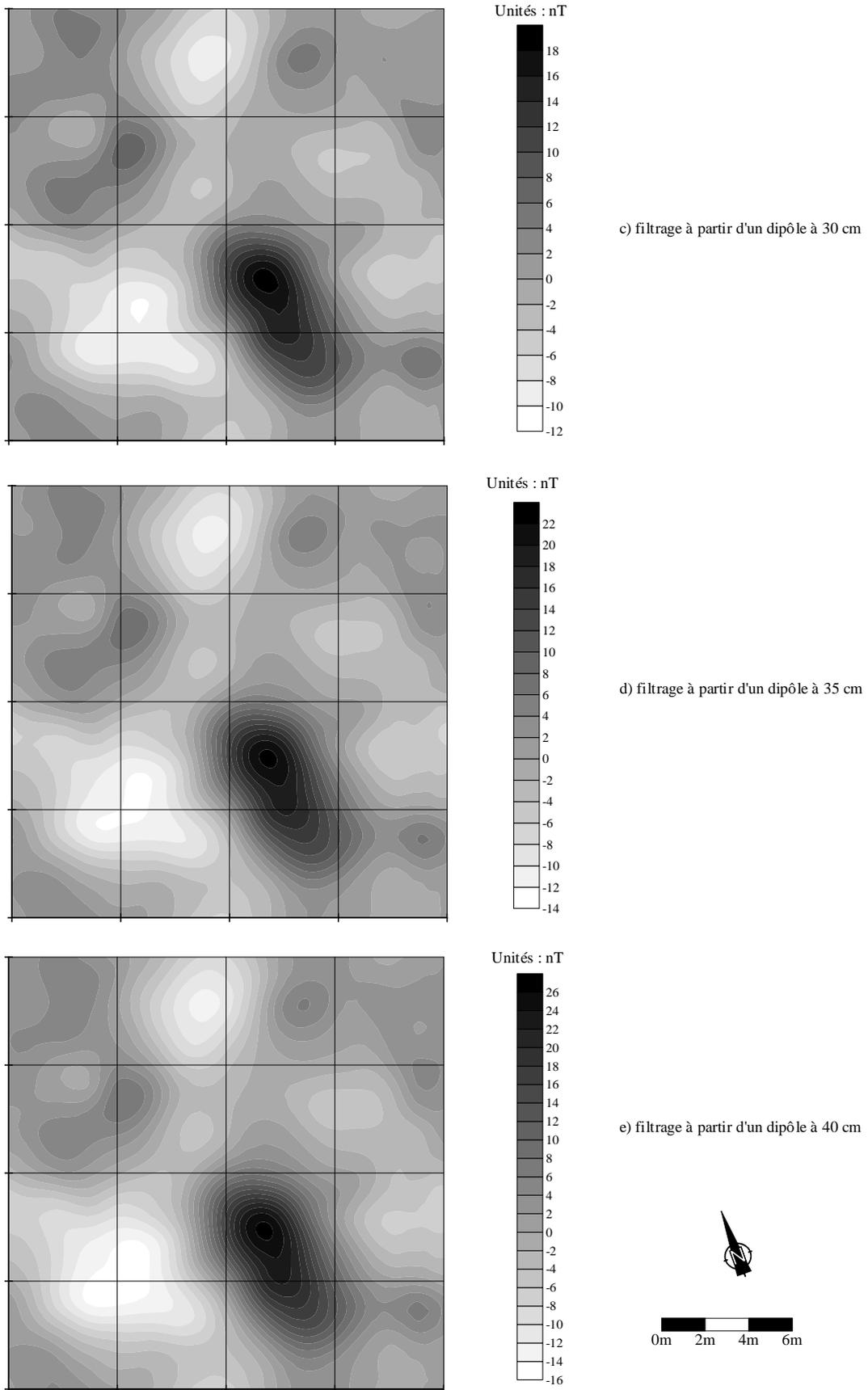


Fig. 4.39c, d et e : Filtrage des données CS150

#### V.4.Conclusion

Les fouilles réalisées sur le site du Petit Chauvort avant les prospections géophysiques laissaient présager que le filtrage des données électromagnétiques allait se heurter aux problèmes des structures à grande extension en profondeur qui, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, sont à l'origine des plus grands écarts observés entre les données magnétiques et les données électromagnétiques filtrées. Le fait que les couches archéologiques soient à une profondeur inférieure à la profondeur d'investigation du CS150 a replacé le problème dans un cas plus classique où la différence de profondeur d'investigation entre le gradiomètre et le CS150 n'entrait pas en ligne de compte. La réponse magnétique de ces couches étant due à l'aimantation induite (avec une contribution possible de l'aimantation visqueuse), le filtrage des données a permis de confirmer la profondeur des sources magnétiques et, de ce fait, estimer celle des niveaux archéologiques.

---

## Conclusion

---

Les résultats présentés dans cette thèse montrent l'intérêt de la double utilisation des méthodes magnétique et électromagnétique en prospection géophysique pour l'étude des propriétés magnétiques des sols.

Pour ce type d'étude, le choix des appareils utilisés, particulièrement en électromagnétisme, est délicat : leurs performances sont inégales et peu d'appareils électromagnétiques capables de mesurer la susceptibilité magnétique apparente avec une bonne stabilité existent sur le marché. La faible profondeur d'investigation constitue le handicap majeur, même en prospection du proche sous-sol. L'étude comparative des appareils Slingram et des systèmes à boucles a permis d'évaluer les performances de chacun d'eux : le MS2 de Bartington, largement utilisé, notamment en Angleterre, est un appareil d'une grande stabilité de mesure mais sa faible profondeur d'investigation le rend essentiellement sensible aux effets de surface. Pour les appareils Slingram, le développement du CS150 permettra de disposer d'un appareil doté d'une bonne profondeur d'investigation qui pourra répondre aux besoins de la pédologie ou de l'archéologie.

Le CS150 constitue l'appareil le mieux adapté pour l'étude comparative de cartes de prospections magnétiques et électromagnétiques. L'étude théorique a en effet montré que la présence de structures à grande extension en profondeur est susceptible de compliquer l'interprétation des données électromagnétiques filtrées. Dans les autres cas, il suffit de choisir soigneusement seule la profondeur du dipôle pour le calcul de la fonction de transfert.

Le filtrage permet donc de caractériser les différents types d'aimantation présents dans le sol. Il est possible, pour une anomalie donnée, de quantifier la réponse due à l'aimantation induite et celle due à la rémanente. Dans le cas où la réponse magnétique est due seulement à l'aimantation induite, les données électromagnétiques filtrées donnent un résultat proche de celui des données magnétiques et permettent de donner une estimation relativement précise de la profondeur des sources de l'anomalie magnétique.

L'utilisation de cette méthode de transformation des données mérite d'être appliquée systématiquement. L'emploi simultané des méthodes magnétique et électromagnétique

apporte en effet une information sur des volumes très différents de ceux des échantillons, elle permettra donc de compléter ces études, nécessairement ponctuelles, et de mieux comprendre, à partir des propriétés, les processus naturels ou anthropiques de la pédogenèse.

---

## Bibliographie

---

**Abadie-Reynal, C., Desreumaux, A., Hesse, A. et Laroche, M.-C., 1996** : Mission archéologique de Zeugma. Rapport sur la campagne de prospection 1995, *Anatolia Antiqua*, **4**, 311-324.

**Algaze, G., Breuninger, R. et Knustad, J., 1991** : The Tigris-Euphrates archaeological reconnaissance project : a preliminary report of 1989-1990 seasons, *Anatolica*, **18**, 175-240.

**Barral, P., 1998** : Verdun sur le Doubs, Le Petit Chauvort (Saône et Loire), Rapport de fouille archéologique programmée, Dijon, S.R.A. Bourgogne.

**Barral, P., 1999.**: Verdun sur le Doubs, Le Petit Chauvort (Saône et Loire), Rapport de fouille archéologique programmée, Dijon, S.R.A. Bourgogne.

**Beaussillon, R., Benech, C. et Tabbagh, A., 1996** : A two frequency slingram apparatus for archaeological and pedological application, *2<sup>nd</sup> Environmental and Engineering Geophysical Society Meeting*, Nantes, 2-5 September, 15-18.

**Benech, C. et Marmet, E., 1999** : Optimum depth of investigation and conductivity response rejection of the different electromagnetic devices measuring apparent magnetic susceptibility, *Archaeological Prospection*, **6**, 31-45.

**Blakemore, R.P., 1975** : Magnetotactic Bacteria, *Science*, **190**, 377-379.

**Chauvin, A., Garcia, Y., Lanos, P. et Laubenheimer, F., 2000** : Paleointensity of geomagnetic field recovered on archaeomagnetic sites from France, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, sous presse.

**Clark, A. J., 1990** : *Seeing beneath the soil*, London : Batsford.

**Colani, C. et Aitken, M.J., 1966a** : Utilisation of magnetic viscosity effects in soils for archaeological prospection, *Nature*, **212**, 1446-1447.

**Colani, C. et Aitken, M.J., 1966b** : A new type of locating device – II. Field trials, *Archaeometry*, **9**, 9-19.

**Cumont, F., 1917** : *Etudes syriennes*, Paris.

- Dabas, M., 1989** : Comportement magnétique des sols dans les domaines fréquentiel et temporel (ARV). Application à la prospection de sites archéologiques, *Thèse de Doctorat*, Université Paris 6.
- Dabas, M., Jolivet, A. et Tabbagh, A., 1992** : Magnetic susceptibility and viscosity of soils in a weak time varying field, *Geophysical Journal Interiors*, **108**, 101-109.
- Dearing J. A., Hay K. L., Baban S. M. J., Huddleston A. S., Wellington E. M; H. & Loveland P. J., 1996** : Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conflicting theories using a national data set, *Geophysical Journal International*, **127**, 728-734.
- Desvignes, G., Barthes, V. et Tabbagh, A., 1992.**: Direct determination of the natural remanent magnetization effect in a hole drilled in layered ground from magnetic field and susceptibility logs, *Geophysics*, **57**, 7, 872-884.
- Desvignes, G. et Tabbagh, A., 1995**: Simultaneous interpretation of magnetic and electromagnetic prospecting for characterisation of magnetic features, *Archaeological Prospection*, **2**, 129-139.
- Desvignes G., Tabbagh A. et Benech C., 1999**, The determination of the depth of magnetic anomaly sources, *Archaeological Prospection*, **6-2**, 85-105.
- Dunlop, D.J., 1973** : Superparamagnetic and single domain threshold sizes in magnetite, *Journal of Geophysical Research*, **78**, 1780-1793.
- Faßbinder, J.W.E., Stanjek, H. et Vali, H., 1990** : Occurrence of magnetic bacteria in soil, *Nature*, **343**, 161-163.
- Faßbinder, J.W.E. et Stanjek, H., 1993** : Occurrence of bacterial magnetite in soils from archaeological sites, *Archaeologia Polona*, **31**, 117-128.
- Faßbinder, J.W.E. et Stanjek, H., 1994** : Magnetic properties of biogenic soil greigite (Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub>), *Geophysical Research Letters*, **21**, 22, 2349-2352.
- Foucault, A. et Raoult, J.-F., 1988** : *Dictionnaire de géologie*, 3<sup>ème</sup> édition, Ed. Masson.
- 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.
- Graham, I.D.G. et Scollar, E., 1976** : Limitations on magnetic prospecting in archaeology imposed by soil properties. *Archaeo-Physica*, **6**, 1-24.

- Guérin, R., Meheni, Y., Rakotondrasoa, G. and Tabbagh, A., 1996** : Interpretation of Slingram conductivity mapping in near surface geophysics: using a single parameter fitting with 1D model. *Geophysical Prospecting*, **44**, 2, 233-249.
- Guillot, A., 1970** : Rapports de fouilles. Fouilles de sauvetage (1969-70) du site de la Tène III du Petit Chauvort (Verdun sur le Doubs), Direction des Antiquités Historiques de Bourgogne, Dijon.
- Heller, F. et Tung-Sheng, L., 1986** : Paleoclimatic and sedimentary history from magnetic susceptibility of loess in China, *Geophysical Research Letters*, **11**, 1169-1172.
- Heller F., Xiuming, L., Tungsheng, L. et Tongchun, X., 1991** : Magnetic susceptibility of loess in China, *Earth and Planetary Science Letters*, **103**, 301-310.
- Hoffmann, V., 1992** : Greigite ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ) : magnetic properties and first domain observations, *Physic of the Earth and Planetary Interiors*, **70**, 288-301.
- Howell, M. I., 1966** : A soil conductivity meter, *Archaeometry*, **9**, 20-23.
- Howell, M. I., 1968** : The soil conductivity anomaly detector (SCM) in archaeological prospection, *Prospezioni Archeologiche*, **3**, 101-104.
- Kalmijn, A.J. et Blakemore, R.P., 1978** : *The magnetic behaviour of mud bacteria in animal migration, navigation and homing*, K. Schmidt & W.T. Keedon Eds, Berlin.
- Le Borgne, E., 1955** : Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel, *Annales de Géophysique*, **11**, 399-419.
- Le Borgne, E., 1960a** : Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol et sur celles du schiste et du granite, *Annales de Géophysique*, **16**, 2, 159-195.
- Le Borgne, E., 1960b** : Etude expérimentale du traînage magnétique dans le cas d'un ensemble de grains magnétiques très fins dispersés dans une substance non magnétique, *Annales de Géophysique*, **16**, 4, 445-494.
- Longworth, G. et Tite, M.S., 1977** : Mössbauer and magnetic susceptibility studies of iron oxides in soils from archaeological sites, *Archaeometry*, **19**, 1, 3-14.
- Maher, B.A. et Taylor, R.M., 1988** : Formation of ultra fined-grained magnetite in soils, *Nature*, **336**, 368-370.
- Maher, B.A. et Thompson, R., 1992** : Pleoclimatic significance of the mineral magnetic record of the chinese loess and paleosols, *Quaternary Research*, **37**, 155-170.

- Mann, S., Sparks, N.H.C., Frankel, R.B., Bazylinski, D.A. et Jannash, H.W., 1990 :** Biomineralization of ferrimagnetic greigite ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ) and iron pyrite ( $\text{FeS}_2$ ) in a magnetotactic bacterium, *Nature*, **343**, 258-261.
- Mullins, C.E., 1974 :** The magnetic properties of soils and their application to archaeological prospecting, *PhD thesis*, University of Essex, *Archaeophysika*, **5**, 143-347.
- Mullins, C.E., 1977 :** Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science – a review, *Journal of Soil Science*, **28**, 223-246.
- Mullins, C.E. et Tite, M.S., 1973a :** Magnetic viscosity, quadrature susceptibility and frequency dependence of susceptibility in single domain assemblies of magnetite and maghemite, *Journal of Geophysical Research*, **78**, 5, 804-809.
- Mullins, C.E. et Tite, M.S., 1973b :** Preisach diagrams and magnetic viscosity phenomena for soils and synthetic assemblies of iron oxide grains, *J. Geomag. Geoelectr.*, **25**, 213-229.
- Néel, L., 1949 :** Théorie du traînage magnétique des ferromagnétiques en grains fins avec application aux terres cuites, *Annales de Géophysique*, **5**, 2, 99-136.
- Parchas, C. et Tabbagh, A., 1978 :** Simultaneous measurements of electrical conductivity and magnetic susceptibility of the ground in electromagnetic prospecting, *Archaeo-Physika*, **10**, 682-691.
- Parchas, C., 1979 :** Mesures simultanées de la conductivité électrique et de la susceptibilité magnétique du sol, Thèse, Université Paris 6.
- Scollar, I., Tabbagh, A., Hesse, A. et Herzog, I., 1990 :** *Archaeological Prospecting and Remote Sensing*, Cambridge University Press, Cambridge, 674 p.
- Sheffer, F., Meyer, B. et Babel, U., 1959 :** [Magnetic measurements as aids in the determination of iron oxide in the soil], *Beitr. Miner. Petrogr.*, **6**, 371-387.
- Singer, M.J. et Fine, P., 1989 :** Pedogenic factors affecting magnetic susceptibility of northern California soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **53**, 1119-1127.
- Skinner, B.J. et Grimaldi, R.F., 1964 :** Greigite, the thiospinel of iron, a new mineral, *American Mineralogist*, **49**, 543-555.
- Stanjek, H., Faßbinder, J.W.E., Vali, H., Wägele, H. et Graf, W., 1994 :** Evidence of biogenic greigite (ferrimagnetic  $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ) in soil, *European Journal of Soil Science*, **45**, 97-103.

**Tabbagh, A., 1974a** : Méthodes de prospection électromagnétique applicables aux problèmes archéologiques, *Archaeo-Physika*, **5**, 351-437.

**Tabbagh, A., 1974b** : Définition des caractéristiques d'un appareil électromagnétique adapté à la prospection archéologique, *Prospezioni Archeologiche*, **9**, 21-33.

**Tabbagh, A., 1982** : L'interprétation des données en prospection électromagnétique avec les appareils SH3 et EM15, *Revue d'Archéométrie*, **6**, 1-9.

**Tabbagh, A., 1985** : The response of a three-dimensional magnetic and conductive body in shallow depth electromagnetic prospecting, *Geophysical Journal Research of Royal Astronomy Society*, **81**, 215-230.

**Tabbagh, A., 1986a** : What is the best coil orientation in the slingram electromagnetic prospecting method ?, *Archaeometry*, **28**, 185-196.

**Tabbagh, A. 1986b** : Applications and advantages of the Slingram electromagnetic method for archaeological prospecting, *Geophysics*, **51**, 3, 576-584.

**Tabbagh, A. et Dabas, M., 1996.**: Absolute magnetic viscosity determination using time domain electromagnetic devices, *Archaeological Prospection*, **4**, 1, 1-13.

**Telford, W.M., Geldart, L.P. et Sheriff, R.E., 1990** : *Applied geophysics*, 2<sup>nd</sup> Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 770 p.

**Thellier, E., 1938** : Sur l'aimantation des terres cuites et ses applications en géophysique, *Thèse de Doctorat ou Annales de l'Institut de Physique du Globe de Paris*, **16**, 157-302.

**Thompson, M. et Oldfield, F., 1986** : *Environmental Magnetism*, Allen and Unwin, London, 227 pages.

**Tite, M.S., 1972** : The influence of geology on the magnetic susceptibility of soils on archaeological sites, *Archaeometry*, **14**, 229-236.

**Tite, M.S. et Linington, R.E., 1975** : Effect of climate on the magnetic susceptibility of soils, *Nature*, **256**, 565-566.

**Tite, M.S. et Mullins, C.E., 1969** : Electromagnetic prospecting, a preliminary investigation, *Prospezioni Archeologiche*, **4**, 95-102.

**Tite, M.S. et Mullins, C.E., 1970** : Electromagnetic prospecting on archaeological site using a soil conductivity meter, *Archaeometry*, **12**, 1, 97-104.

---

**Tite, M.S. et Mullins, C.E., 1971** : Enhancement of the magnetic susceptibility of soils on archaeological sites, *Archaeometry*, **13**, 2, 209-219.

**Verosub, K.L., Fine P., Singer, M.J. et Tenpas, J., 1993** : Pedogenesis and paleoclimate : interpretation of the magnetic susceptibility of chinese loess-paleosol sequences, *Geology*, **21**, 1011-1014.

**Wagner, J., 1976** : *Seleukeia am Euphrat. Zeugma*, Wiesbaden, L. Reichert.

## Liste des figures

### Chapitre préliminaire : Prospection magnétique sur la ville d'Apamée de l'Euphrate

FIGURE 0.1a : Localisation du site d'Apamée, sur la rive gauche de l'Euphrate, à mi-chemin entre Gaziantep et Sanli-Urfa. ....	4
FIGURE 0.1b : Localisation de la ville d'Apamée (détail) d'après W.R. Shepherd (1923) avec au nord-est, la ville d'Edes, l'antique Sanli-Urfa, et au sud-ouest, la ville d'Antioche. ....	4
FIGURE 0.1c : Vue générale du site d'Apamée, prise de la rive droite où s'étend le site de Séleucie-Zeugma. Le village de Tilmusa, à gauche sur la photo, recouvre une partie de la ville antique ; le reste de la surface est occupée par des vergers et des champs cultivés. ....	5
FIGURE 0.2a : Prospection électrique de la tour circulaire et de la tour 12 sur le rempart Nord.....	7
FIGURE 0.2b : Fouille de la tour circulaire : le diamètre intérieur de la tour est de 11 m et l'épaisseur du rempart est de 3 m. La tour est composée de blocs calcaires en appareil polygonal, avec deux assises en fondation et deux assises en élévation ; le reste de la tour était construit en brique crue, dont il ne reste plus aucune trace. ....	7
FIGURE 0.4a : Prospection magnétique sur les tours 15 et 16 du rempart nord. Les branches de la courtine font chacune 25 m de long pour une épaisseur de 3,5 m ; l'intérieur des tours forment un rectangle de 7 m×11 m, les murs latéraux ayant une épaisseur de 2,5 m et la partie frontale, la plus exposée, atteint 3,5 m.....	9
FIGURE 0.4b : Fouille de la tour 13. Au premier plan, on aperçoit le seuil d'entrée de la tour. ....	10
FIGURE 0.5 : Carte prospection magnétique sur le rempart nord. La forme en demi-cercle du seuil de la porte occidentale du rempart nord est clairement visible.....	11
FIGURE 0.6a : Fouille du seuil de la porte orientale du rempart nord Au premier, on aperçoit la courtine en arc de cercle qui vient buter sur la voie proprement dite, composée de blocs bien ajustés à surface plane .....	12
FIGURE 0.6b : Plan de la fouille de la porte orientale du rempart nord. ....	12

FIGURE 0.7 : Réalisée dans la partie nord-est de la ville, cette carte de prospection montre un îlot partiellement construit bordé à l'est par une voie puis un autre îlot entièrement aménagé.....	14
FIGURE 0.8 : (a) L'image obtenue par la prospection magnétique appelait une identification et une datation des vestiges par la fouille. (b) Une fouille a donc été ouverte sur une zone sélectionnée selon les indications de la carte. (c) Un sondage a mis au jour deux murs à moins de 50 cm de la surface : un mur de façade d'îlot et un second à l'intérieur de l'habitation : au premier plan, les murs d'habitation ; au deuxième plan, un sondage implanté en travers de la rue hellénistique. ....	15
FIGURE 0.9a : Détail de la carte de prospection à l'est de la porte sud du rempart oriental ..	16
FIGURE 0.9b : Fouille des magasins bordant la voie est-ouest, à l'est de la porte sud du rempart oriental .....	16

## Chapitre 1 : Propriétés magnétiques des sols

Aucune figure pour ce chapitre

## Chapitre 2 : Mesure des propriétés magnétiques des sols en prospection géophysique

FIGURE 2.1 : Magnétomètre à proton OMNI IV (EDA) .....	36
La sonde est portée à 0,30 m au-dessus du sol afin de se limiter aux effets de subsurface.	
FIGURE 2.2 : Le gradiomètre au Césium G858 de Geometrics.....	36
FIGURE 2.3 : Le SH3, avec sa boîte d'acquisition et son câble de connexion. ....	39
FIGURE 2.4 : Le CS150 en position de mesure, la bobine réceptrice se trouve au niveau des roues. ....	39
FIGURE 2.5 : L'EM38 de Geonics en position DMH (VCP) .....	40
FIGURE 2.6 : Nomenclature des différentes orientations de bobines pour les appareils Slingram .....	38
DMH : dipôle magnétique horizontal	
DMV : dipôle magnétique vertical	

VCP : vertical coplanar	
HCP : horizontal coplanar	
FIGURE 2.7 : Le MS2 de Bartington .....	41
FIGURE 2.8 : Influence de la conductivité sur la réponse en phase pour les appareils de type Slingram .....	44
FIGURE 2.9a : Influence de la conductivité sur la réponse en phase pour les systèmes à boucles.....	46
FIGURE 2.9b : Influence du choix de la fréquence sur la réponse en phase pour les systèmes à boucle .....	48
FIGURE 2.10a : Modèle 1 : Cas d'une couche magnétique résistante dans un milieu conducteur .....	50
FIGURE 2.10b : Modèle 2 : Cas d'une couche magnétique conductrice dans un milieu résistant.....	51
FIGURE 2.11 : Variation de la réponse en phase en fonction de la profondeur de la couche intermédiaire.....	52
FIGURE 2.12a : Variation de la réponse en phase en fonction de la profondeur d'une fine couche.....	54
FIGURE 2.12b : Variation de la réponse en phase en fonction de la profondeur d'une fine couche magnétique conductrice.....	54

### **Chapitre 3 : Comparaison de prospections magnétique et électromagnétique par filtrage linéaire des données : principe et analyse des modèles synthétiques**

FIGURE 3.1 : Position et caractéristiques de la structure en "L" .....	60
FIGURE 3.2 : Données synthétiques sur la structure en "L" du CS150 (4,4 kHz) et du magnétomètre.....	63
FIGURE 3.3 : Données synthétiques sur la structure en "L" du SH3 et du magnétomètre .....	64
FIGURE 3.4: Position et caractéristiques de la structure en forme de plaque.....	65
FIGURE 3.5 a, b, c et d : Données synthétiques sur la structure en forme de plaque du CS150 (4,4 kHz) et du magnétomètre.....	67

FIGURE 3.5 e, f et g : Données synthétiques de la structure en forme de plaque pour le CS150 (4,4 kHz) .....	68
FIGURE 3.6 a, b, c et d : Données synthétiques sur la structure en forme de plaque pour le SH3 et le magnétomètre .....	70
FIGURE 3.6 e, f et g : Données synthétiques sur la structure en forme de plaque pour le SH3 .....	71
FIGURE 3.7 : Position et caractéristiques de la structure en forme de cube .....	72
FIGURE 3.8 : Données synthétiques sur la structure en forme de cube pour le CS150 (4,4 kHz) et le magnétomètre .....	74
FIGURE 3.9 : Données synthétiques sur la structure en forme de cube pour le SH3 et le magnétomètre .....	76

## Chapitre 4 : Essais expérimentaux

FIGURE 4.1 : Position de la structure "L1" dans la zone de prospection et localisation des échantillons prélevés à la tarière .....	79
FIGURE 4.2 : Coupe verticale de la structure "L1" .....	79
FIGURE 4.3 : Prospection électrique sur la structure "L1" .....	81
FIGURE 4.4 : Prospection SH3 sur la structure "L1" (Composante en quadrature) .....	81
FIGURE 4.5 : Prospection avec le MS2 Bartington sur la structure "L1" .....	83
FIGURE 4.6 : Prospection avec le DECCO sur la structure "L1" .....	83
FIGURE 4.7 : Prospection avec le SH3 (composante en phase) sur la structure "L1" .....	85
FIGURE 4.8 : Prospection avec l'EM38 (composante en phase, VCP) sur la structure "L1" ..	84
FIGURE 4.9 : Prospection avec le CS150 (4,4 kHz, composante en phase) de la structure "L1" .....	86
FIGURE 4.10 : Position de la structure "L2" dans la zone de prospection.....	89
FIGURE 4.11 : Coupe verticale de la structure "L2" .....	89
FIGURE 4.12 : Prospection SH3 (composante en quadrature) de la structure "L2" .....	90
FIGURE 4.13 : Prospection avec le MS2 Bartington sur la structure "L2" .....	92
FIGURE 4.14 : Prospection avec le SH3 (composante en phase) sur la structure "L2" .....	92
FIGURE 4.15 : Prospection avec l'EM38 (VCP, composante en phase) sur la structure "L2" .....	93

FIGURE 4.16 : Prospection magnétique avec le magnétomètre à proton OMNI IV sur la structure .....	94
FIGURE 4.17 : Filtrage des données SH3 acquises sur la structure "L2" .....	96
FIGURE 4.18a : Représentation des valeurs obtenues par filtrage sur le profil P7.....	97
FIGURE 4.18b : Représentation des valeurs obtenues par filtrage sur la ligne 14.....	97
FIGURE 4.19a : Représentation moyennée des valeurs obtenues par filtrage sur le profil P7.....	98
FIGURE 4.19b : Représentation moyennée des valeurs obtenues par filtrage sur la ligne 14.....	98
FIGURE 4.20 : Filtrage des données EM38 acquises sur la structure "L2" .....	99
FIGURE 4.21a : Représentation des valeurs obtenues par filtrage sur le profil P7.....	100
FIGURE 4.21b : Représentation des valeurs obtenues par filtrage sur la ligne 14.....	100
FIGURE 4.22 : L'atelier de potier est situé au nord-est de la commune de Dampierre sous Bouhy, au lieu-dit "Le Chaillou", dans le bois Baulard.....	101
FIGURE 4.23 : Prospection SH3 : susceptibilité magnétique apparente.....	103
FIGURE 4.24 : Prospection DECCO : viscosité magnétique apparente.....	103
FIGURE 4.25b : Cadastre moderne sur lequel la zone prospectée apparaît comme un seul tenant.....	104
FIGURE 4.25a : Cadastre de 1836 : la zone prospectée était alors divisée en deux parcelles.....	104
FIGURE 4.26 : Prospection SH3 : résistivité électrique apparente .....	105
FIGURE 4.27 : Localisation de la zone prospectée en maille fine .....	106
(carte de susceptibilité magnétique obtenue avec le SH3)	
FIGURE 4.28a : Prospection SH3 maille fine : susceptibilité magnétique apparente.....	107
FIGURE 4.28b : Prospection SH3 maille fine : résistivité électrique apparente .....	107
FIGURE 4.29a : Détail de la prospection SH3 (composante en phase) sur la zone du four..	108
FIGURE 4.29b : Prospection magnétique avec le G858 sur la zone du four.....	108
FIGURE 4.30 : Filtrage des données SH3 sur le four.....	111
FIGURE 4.31 : Cartographie de l'aimantation rémanente de l'anomalie du four .....	112
FIGURE 4.32 : Localisation de l'habitat gaulois au lieu-dit "Le Petit Chauvort", au Nord-Est de la commune de Verdun sur le Doubs. ....	114
Les traits hachurés signalent l'emprise du site.	

---

FIGURE 4.33 : Localisation des sondages archéologiques 1996 et 1997 (zones en semis de points), et des prospections magnétiques MAG1 et MAG2.....	115
FIGURE 4.34a : Prospection au gradiomètre au Césium G858 : carte MAG1 .....	117
FIGURE 4.34b : Prospection au gradiomètre au Césium G858 : carte MAG1 interprétée ...	118
FIGURE 4.35a : Prospection au gradiomètre au césium : carte MAG2 .....	119
FIGURE 4.35b : Carte MAG2 : données interprétées .....	120
FIGURE 4.36 : Prospection SH3 : susceptibilité magnétique apparente.....	121
FIGURE 4.37a : Détail de la prospection magnétique (champ total) .....	123
FIGURE 4.37b : Prospection CS150 (4,4kHz) : susceptibilité magnétique apparente.....	123
FIGURE 4.38a : Superposition du plan de fouille et de la carte magnétique .....	124
FIGURE 4.38b : Superposition du plan de fouille et de la prospection CS150.....	124
FIGURE 4.39a et b : Filtrage des données CS150.....	128
FIGURE 4.39c, d et e : Filtrage des données CS150 .....	129

---

## Liste des tableaux

---

### Chapitre 3 : Comparaison de prospections magnétique et électromagnétique par filtrage linéaire des données : principe et analyse des modèles synthétiques

TABLEAU 3.1 : Caractéristiques des données obtenues sur la structure en "L" en magnétisme et en électromagnétisme pour le CS150 (4.4 kHz) après filtrage.....	61
TABLEAU 3.2 :Caractéristiques des données obtenues sur la structure en "L" en magnétisme et en électromagnétisme pour le SH3 après filtrage. ....	62
TABLEAU 3.3 : Anomalie de la plaque : caractéristiques des données obtenues sur la plaque en M et en EM pour le CS150 (4.4 kHz) après filtrage.....	66
TABLEAU 3.4 : Anomalie de la plaque : caractéristiques des données obtenues sur la plaque en M et en EM pour le SH3 après filtrage.....	69
TABLEAU 3.5 : Structure en cube : caractéristiques des données obtenues en M et en EM pour le CS150 (4,4 kHz) après filtrage.....	73
TABLEAU 3.6 : Structure en cube : caractéristiques des données obtenues en magnétisme et en électromagnétisme pour le SH3 après filtrage.....	75

### Chapitre 4 : Essais expérimentaux

TABLEAU 4.1 : Mesures de susceptibilité massique et volumique sur la branche sud du "L1" .....	87
TABLEAU 4.2 : Mesures de susceptibilité massique et volumique sur la branche nord du "L1" .....	87
TABLEAU 4.3 : Mesures de susceptibilité massique et volumique sur le terrain avoisinant le "L1" .....	88
TABLEAU 4.4 : Caractéristiques des données obtenues sur le site de Verdun sur le Doubs (carré 20×20 m <sup>2</sup> ) en M et en EM pour le CS150 (4,4 kHz) après filtrage.....	125

# Annexe 1 : Calcul de la réponse à une boucle concentrique pour un sol tabulaire

Considérons une boucle circulaire horizontale de rayon  $a$ , située à une distance  $d$  au-dessus du sol. Pour cette configuration, le système de coordonnées circulaire  $(r, \varphi, z)$  est le mieux adapté : le champ électromagnétique ne comprendra que les trois composantes  $H_r$ ,  $H_z$  et  $E_\varphi$ . Ces trois composantes peuvent être calculées à partir du potentiel vecteur  $A$  ( $\vec{B} = \text{rot}\vec{A}$ ), caractérisé par sa seule composante  $A_\varphi$ .

## . Calcul du champ primaire et du potentiel

Pour un point  $P$  situé sur l'axe de la boucle, l'expression du champ primaire émis par la boucle est :

$$(1) \quad H_{zp} = \frac{1}{2} \frac{a^2 I}{(a^2 + (z+d)^2)^{3/2}}$$

où  $I$  = courant injecté dans la boucle

Il est possible d'écrire  $H_{zp}$  sous la forme d'une transformée de Hankel :

$$(2) \quad H_{zp} = \frac{aI}{2} \frac{a}{(a^2 + (z+d)^2)^{3/2}} = \frac{aI}{2} \left( -\frac{\partial}{\partial a} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{(z+d)^2 + a^2}} \right) = \frac{aI}{2} \int_0^{+\infty} \lambda e^{-\lambda|z+d|} J_1(\lambda a) d\lambda$$

où  $J_1$  = fonction de Bessel de première espèce et d'ordre 1

Nous avons entre  $H_{zp}$  et  $A_{\varphi p}$  la relation suivante:

$$(3) \quad H_{zp} = \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_{\varphi p})$$

Comme  $A_{\varphi p}$  satisfait l'équation :

$$(4) \quad \frac{\partial^2 A_{\varphi p}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_{\varphi p}}{\partial r} - \frac{A_{\varphi p}}{r^2} + \frac{\partial^2 A_{\varphi p}}{\partial z^2} = 0,$$

une solution générale de  $A_{\varphi p}$  peut s'écrire :

$$(5a) \quad A_{\varphi p} = \int_0^{+\infty} \alpha_p(\lambda) e^{-\lambda|z+d|} J_1(\lambda r) d\lambda$$

$$\text{d'où :} \quad (5b) \quad H_{-p} = \frac{1}{\mu_0} \int_0^{+\infty} \alpha(\lambda) e^{-\lambda(z+d)} \lambda J_0(\lambda r) d\lambda$$

En faisant  $r=0$  et en identifiant à l'expression (2), on peut déduire l'expression de  $\alpha_p(\lambda)$  :

$$(6) \quad \alpha_p(\lambda) = \frac{I a \mu_0}{2} J_1(\lambda a)$$

### . Calcul du champ secondaire et du potentiel

Dans l'air,  $A_{\varphi s}$  vérifie l'équation :

$$(7) \quad \frac{\partial^2 A_{\varphi s}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_{\varphi s}}{\partial r} - \frac{A_{\varphi s}}{r^2} + \frac{\partial^2 A_{\varphi s}}{\partial z^2} = 0$$

la solution générale de cette équation peut être exprimée par :

$$A_{\varphi s} = \int_0^{+\infty} \alpha_0(\lambda) e^{-\lambda|z+d|} J_1(\lambda r) d\lambda$$

Pour la  $p^{\text{ième}}$  couche, on a :

$$(8) \quad \frac{\partial^2 A_{\varphi s}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_{\varphi s}}{\partial r} - \frac{A_{\varphi s}}{r^2} + \frac{\partial^2 A_{\varphi s}}{\partial z^2} - i \sigma_p \mu_p \omega A_{\varphi s} = 0$$

la solution générale de cette équation peut être exprimée par :

$$(9) \quad A_{\varphi s} = \int_0^{+\infty} (\alpha_p(\lambda)e^{-u_p(z+d)} + \beta_p(\lambda)e^{u_p(z+d)})J_1(\lambda r)d\lambda$$

$$\text{avec } \gamma_p^2 = i\sigma_p\mu_p\omega \text{ et } u_p = \sqrt{\lambda^2 + \gamma_p^2}$$

### . Determiation de $\alpha_0(\lambda)$

Dans cette partie, pour déterminer  $\alpha_0(\lambda)$ , on considère les conditions aux limites de chaque interface. Les expressions de  $\alpha_p(\lambda)$  et  $\beta_p(\lambda)$  seront calculés par un processus d'itération.

A l'interface,  $H_r$ ,  $\mu.H_z$  et  $E_\varphi$  sont continus. On a donc :

.  $\mu.H_z$  continu implique par intégration que  $A_\varphi$  est continu.

$$. H_r = \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} \text{ donc } \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} \text{ continu}$$

$$. E_\varphi = -i\omega A_\varphi \text{ donc } A_\varphi \text{ continu}$$

On a donc 2N conditions pour 2N inconnues.

Nous définissons  $R_N$  comme la transformée de Hankel du rapport :

$$\frac{\frac{1}{\mu_N} \frac{\partial A_\varphi}{\partial z}}{A_\varphi},$$

$$\text{pour la } N^{\text{ième}} \text{ couche nous avons } R_N = \frac{u_N}{\mu_N} \quad (10)$$

Pour la  $p^{\text{ième}}$  couche :

$$(11) \quad R_p = \frac{-\frac{u_p}{\mu_p} (\alpha_p e^{-u_p h_p} - \beta_p e^{u_p h_p})}{\alpha_p e^{-u_p h_p} + \beta_p e^{u_p h_p}}$$

$$\text{et (12) } R_{p+1} = \frac{-\frac{u_p}{\mu_p} (\alpha_p e^{-u_p h_{p+1}} - \beta_p e^{u_p h_{p+1}})}{\alpha_p e^{-u_p h_{p+1}} + \beta_p e^{u_p h_{p+1}}}$$

Si nous calculons le facteur  $\frac{\alpha_p}{\beta_p}$  dans (11) et le remplaçons par (12), nous obtenons

une relation de récurrence entre  $R_p$  et  $R_{p+1}$  :

$$(13) \quad R_p = -\frac{u_p}{\mu_p} \frac{R_{p+1} - \frac{u_p}{\mu_p} th(u_p e_p)}{\frac{u_p}{\mu_p} - R_{p+1} th(u_p e_p)}$$

De cette relation, nous pouvons calculer  $R_1$  à  $z=0$  par le biais de l'expression du potentiel dans l'air et on obtient :

$$(14) \quad R_1 = \frac{\frac{\lambda}{\mu_0} \alpha_0 - \frac{I a \mu_0}{2} \frac{\lambda}{\mu_0} e^{-\lambda d}}{\alpha_0 + \frac{I a \mu_0}{2} J_1(\lambda a) e^{-\lambda d}}$$

L'expression de  $\alpha_0$  est alors :

$$(15) \quad \alpha_0 = \frac{\frac{\lambda}{\mu_0} + R_1}{\frac{\lambda}{\mu_0} - R_1} \frac{I a \mu_0}{2} e^{-\lambda d}$$

A partir de l'expression du potentiel  $A_{\varphi s}$  d'une boucle coïncidente de rayon  $a$ , nous obtenons la fem :

$$(16) \quad e(t) = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \oint_{\text{Circle}} \vec{r} \otimes \vec{A}_{\varphi} \cdot d\vec{s} = -\frac{\partial}{\partial t} (2\pi a A_{\varphi s}) = -2\pi a i \omega A_{\varphi s}(a)$$