



HAL
open science

L'apport de l'outil géophysique pour la reconnaissance et la caractérisation des sites en archéologie préventive, méthodes et perspectives : exemples en Alsace

François-Xavier Simon

► To cite this version:

François-Xavier Simon. L'apport de l'outil géophysique pour la reconnaissance et la caractérisation des sites en archéologie préventive, méthodes et perspectives : exemples en Alsace. Archéologie et Préhistoire. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2012. Français. NNT: . tel-00749112

HAL Id: tel-00749112

<https://theses.hal.science/tel-00749112>

Submitted on 6 Nov 2012

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 PIERRE ET MARIE CURIE**

Spécialité

GÉOPHYSIQUE APPLIQUÉE
Géosciences et Ressources Naturelles (ED 398)

Présentée par

M. François-Xavier SIMON

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

Sujet de la thèse :

**L'apport de l'outil géophysique pour la reconnaissance et la caractérisation des sites
en archéologie préventive, méthodes et perspectives : exemples en Alsace**

soutenue le : 24 avril 2012

devant le jury composé de :

M. Jörg FASSBINDER, Rapporteur, Université de Munich

M. Jean-Paul JACOB Examineur, Inrap

M. David JORDAN, Rapporteur, Université de Mayence

M. Philippe KUCHLER Invité, Pôle d'Archéologie Interdépartemental Rhénan

M. Christophe PETIT Examineur, PARIS I

M. Michel REDDE Examineur, EPHE

M. Alain TABBAGH, Directeur de thèse, UPMC

A la mémoire d'Angélique...

« ... alors les techniques géophysiques auront permis un véritable progrès, dans la mesure où elles n'auront pas servi de décors factice, ni supplanté, comme on l'imagine volontiers à tort, les techniques éprouvées de la fouille et l'intime relation qui doit exister entre l'archéologue et les sédiments. C'est seulement si ces rapports ont été améliorés, si quelque nouveau moyen d'investigation a été ainsi créé, que l'apport des techniques de prospection aura été utile à la découverte du passé. »

Albert Hesse, 1966

RESUME

L'apport de l'outil géophysique pour la reconnaissance et la caractérisation des sites en archéologie préventive : méthodes et perspectives, exemples en région Alsace

Cette étude a été motivée par un constat : malgré sa capacité à reconnaître les sites, la géophysique est absente des méthodes couramment utilisées en archéologie préventive. Nous avons donc essayé de déterminer si son apport aux différentes phases de l'étude des sites, de leur détection à leur caractérisation, est substantiel. L'Alsace fournit un cadre d'étude adéquat : grande diversité de sols, contextes environnementaux variés et forte pression démographique. 12 sites s'échelonnant du Néolithique au Second Moyen-âge ont été étudiés à travers le diagnostic, la fouille et les prospections hors emprise. Pour celles-ci, l'utilisation de la géophysique est évidente: elle renseigne l'extension des occupations par des méthodes non-intrusives en apportant des informations spatiales clés à l'échelle du site et du territoire. En association avec la fouille, sur la surface décapée, la géophysique s'avère complémentaire des observations car elle reconnaît des structures fantômes en plan et en stratigraphie. Cela entraîne une réflexion sur la nature des vestiges et la façon dont ils sont appréhendés. Sur le diagnostic, la géophysique apporte une information spatiale nécessaire à l'identification du site : elle ignore les limitations des sondages mécaniques systématiques en remettant en contexte les structures isolées, en fournissant une vue générale du site et en reconnaissant des structures entre et dans le prolongement des tranchées. Au final, la géophysique devrait être intégrée à la carte archéologique, à l'instar des autres méthodes de prospections qui, pondérées par leur efficacité, permettraient de repenser la gestion et la conservation du patrimoine archéologique in-situ.

ABSTRACT

Contribution of geophysical tools for the characterization and the recognition of sites in French preventive archaeology: methods and perspectives, examples in the Alsace region

This study was prompted to be one observation: despite a capacity to recognize archaeological sites, geophysical prospection was not used as a conventional process in French preventive archaeology. Consequently our work aims to delineate a possible contribution in the different stages of studies: from recognition to characterization of sites. The framework of Alsace region is adequate as it shows a great variety of soils, a great variety of environmental contexts, and also a strong population pressure. In this area, we have considered 12 archaeological sites, the dates of which cover from the Neolithic to Middle Age periods. Their study comprises trial trenching, excavations and surveys outside the limits of the development project. This last case geophysical prospection is undisputed: it assesses site extension with non-intrusive methods and gives spatial information from site to territory scale. In conjunction with the excavations, over stripped surface level, geophysics is complementary to conventional observations as it recognizes “ghost” features both in stratigraphy and planimetry. Such a characterization suggests a reflection on the nature of topic and how excavations must be proceeded. Compared to trial trenching, geophysics delivers spatial information needed to site identification. It brings out limits of this practice by giving the context of single features, a global view of the site and detects structure between trenches. Finally, geophysics is well adapted to the archaeological mapping. As other prospection methods, weighted with their efficiency, it’s also well useful for archaeological heritage management and in-situ preservation.

TABLE DES MATIERES

RESUME	7
ABSTRACT	9
TABLE DES MATIERES.....	11
REMERCIEMENTS.....	19
INTRODUCTION	23
1 L'ARCHEOLOGIE PREVENTIVE	24
2 LES METHODES ARCHEOLOGIQUES : UN FREIN A L'UTILISATION DE LA GEOPHYSIQUE ?	25
3 HISTORIQUE DE L'UTILISATION DE LA GEOPHYSIQUE EN ARCHEOLOGIE PREVENTIVE.....	26
4 PROBLEMES, PROBLEMATIQUES ET PROPOSITIONS	29
PARTIE I : THEORIE, METHODOLOGIE ET INSTRUMENTATION.....	31
1 LES PROPRIETES ELECTRIQUES.....	32
1.1 <i>La conductivité électrique</i>	32
1.2 <i>Paramètres physiques</i>	33
1.2.1 La concentration ionique de la solution des sols	33
1.2.2 La fraction argileuse	33
1.2.3 La température	34
1.2.4 La teneur en eau.....	35
1.2.5 La loi d'Archie	35
1.3 <i>Variabilité naturelle et anthropique de la résistivité électrique</i>	35
1.3.1 Le climat	35
1.3.2 Traitement des sols	36
1.3.2.1 La végétation	36
1.3.2.2 Tassement et déstructuration du sol	37
2 LES PROPRIETES MAGNETIQUES	38
2.1 <i>Aimantation induite, aimantation rémanente</i>	38
2.1.1 La susceptibilité magnétique.....	38
2.1.2 L'aimantation rémanente.....	38
2.2 <i>Les comportements magnétiques</i>	39
2.2.1 Les diamagnétiques.....	39
2.2.2 Les paramagnétiques.....	39
2.2.3 Les ferromagnétiques.....	39
2.2.3.1 Les ferromagnétiques stricts	39
2.2.3.2 Les ferrimagnétiques.....	40
2.2.3.3 Les antiferromagnétiques	40
2.2.3.4 Les domaines de Weiss.....	41
2.2.4 Les superparamagnétiques	41
2.3 <i>Les minéraux porteurs du signal magnétique</i>	42
2.3.1 La magnétite : Fe_3O_4	42
2.3.2 La maghémite : γFe_2O_3	42
2.3.3 L'hématite : αFe_2O_3	42
2.3.4 La greigite : Fe_3S_4	43
2.3.5 La lépidocrocite : $\gamma FeOOH$	43
2.3.6 La goethite : $\alpha FeOOH$	44
2.4 <i>Les aimantations rémanentes</i>	44
2.4.1 La viscosité magnétique	45
2.5 <i>Origine du signal magnétique</i>	46
2.5.1 Pédogenèse	46
2.5.1.1 L'altération de la roche mère	46

2.5.1.2	La formation du sol et ses relations avec le signal magnétique.....	47
2.5.2	La chauffe des matériaux	49
2.5.2.1	Facteurs physiques de la chauffe	49
2.5.2.2	Influence de la nature du matériel sédimentaire.....	50
2.6	<i>Evolution du signal magnétique des sols</i>	51
2.6.1	Facteurs naturels	51
2.6.1.1	Influence du climat	51
2.6.1.2	La topographie.....	52
2.6.1.3	Végétation	53
2.6.2	Facteurs anthropiques.....	54
2.6.2.1	La mise en valeur des terres.....	54
2.6.2.2	Le labour	54
2.6.2.3	Drainage et billons.....	54
2.6.2.4	Ecobuage, essartage et culture sur brûlis	54
2.6.2.5	Modification du signal magnétique sur les sites archéologiques	55
3	LES OUTILS DE PROSPECTIONS.....	57
3.1	<i>La prospection électrique</i>	57
3.1.1	Principe de mesure.....	57
3.1.2	Configuration d'implantation des électrodes.....	57
3.1.3	Problème inverse.....	59
3.1.4	Les mesures	59
3.1.4.1	Le sondage électrique 1D	59
3.1.4.2	La tomographie électrique	60
3.1.4.3	La cartographie électrique.....	61
3.2	<i>La prospection magnétique</i>	62
3.2.1	Origine et comportement du champ magnétique terrestre	62
3.2.2	Formation et comportement des anomalies magnétiques.....	62
3.2.3	Les appareils mis en œuvre	64
3.2.3.1	Le magnétomètre ou gradiomètre de type fluxgate.....	64
3.2.3.2	Les magnétomètres à pompage optique	65
3.3	<i>La prospection électromagnétique</i>	66
3.3.1	Historique	66
3.3.2	Principe généraux.....	66
3.3.3	Les appareils électromagnétiques fréquentiels	67
3.3.3.1	Le faible nombre d'induction (LIN).....	67
3.3.3.2	Les appareils Slingram	67
3.3.3.3	Les configurations.....	68
3.3.3.4	Le CS60	68
3.3.3.5	L'EM 31	69
3.3.3.6	Les appareils à boucle	69
3.3.3.7	Le MS2	69
3.3.4	Les appareils électromagnétiques temporels (Time Domain, TDEM).....	70
3.3.5	Principe.....	70
3.3.6	Le VC100.....	70
	PARTIE II : ANALYSE CRITIQUE DE PROSPECTIONS DE SITES EN ALSACE	71
1	LA GEOPHYSIQUE ET L'ARCHEOLOGIE EN ALSACE.....	72
2	CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL ET AMENAGEMENT DU TERRITOIRE.....	74
2.1	<i>Le climat alsacien</i>	74
2.1.1	Températures	74
2.1.2	Précipitations.....	74
2.1.3	Bilan	75

2.2	<i>Géologie de l'Alsace et définition des grands ensembles structuraux</i>	75
2.2.1	Géologie structurale d'Alsace.....	75
2.2.2	Les grands ensembles structuraux	77
2.2.2.1	Les Vosges et le piémont.....	77
2.2.3	Les collines calcaires et terrasses lœssiques	78
2.2.3.2	La plaine.....	80
2.2.3.3	Les cônes de déjection	82
2.2.3.4	Aménagement du Rhin et de l'Ill.....	83
2.2.3.5	Conclusion	84
2.3	<i>L'aménagement du territoire en Alsace</i>	86
2.3.1	Les grands projets d'aménagements.....	88
2.3.2	L'occupation des sols.....	90
3	SITES DU MASSIF VOSGIEN ET DE SON PIÉMONT	92
3.1	<i>Bernardvillé – Baumgarten</i> -	92
3.1.1	Contexte géomorphologique	92
3.1.2	Contexte archéologique	93
3.1.3	Résultats obtenus en prospection électrique	95
3.2	<i>Obernai – Hôpital Schulbach</i> -	100
3.2.1	Contexte archéologique	101
3.2.2	Contexte géomorphologique	101
3.2.3	Résultats géophysiques	101
4	LES SITES SUR TERRASSES LÛESSIQUES ET COLLINES CALCAIRES	107
4.1	<i>Duntzenheim – Sonnenrain</i> -	107
4.1.1	Contexte géomorphologique	108
4.1.2	Contexte archéologique	109
4.1.3	Résultats géophysiques	110
4.1.3.1	Mesures sur surface décapée.....	110
4.1.3.2	Cartographie de la villa gallo-romaine	114
4.1.3.3	Cartographie de l'extension du site d'habitat alto-médiéval.....	118
4.2	<i>Steinbourg – Altenberg, Ramsberg</i> -	122
4.2.1	Contexte géomorphologique	123
4.2.2	Contexte archéologique	124
4.2.3	Résultats géophysiques	124
4.3	<i>Bernolsheim – Plateforme d'Activité Départementale</i> –	130
4.3.1	Contexte géologique	131
4.3.2	Contexte archéologique	133
4.3.3	La prospection magnétique du secteur 2.....	134
4.3.4	Les mesures de susceptibilité magnétique sur la nécropole Grossgartach. ..	140
5	LES SITES DE PLAINES – LES TERRASSES ALLUVIALES.....	143
5.1	<i>Sainte-Croix-en-Plaine</i>	143
5.1.1	Contexte archéologique	143
5.1.2	Contexte géomorphologique	145
5.1.3	Les sondages électriques.....	146
5.1.4	Les campagnes de prospections aériennes.....	147
5.1.5	La nécropole Jebesen Boden - Nordfeld.....	148
5.1.5.1	Validation des outils géophysiques sur des structures funéraires.....	148
5.1.5.2	Diagnostic Nordfeld.....	149
5.1.5.3	Diagnostic Jebesen Boden.....	150
5.1.5.4	Caractérisation de la partie orientale de la nécropole.....	151
5.1.5.5	Etude du double fossé.....	152
5.1.5.6	Cartographie des principaux paléochenaux.....	155

5.1.5.7	Interprétation de la nécropole de Jebesen Boden.....	157
5.1.6	La nécropole Oberesholzackerfeld.....	159
5.1.6.1	Essai sur la nécropole Rittplatz : Y-a-t-il une nécropole continue entre Rittplatz et Oberes Holzackerfeld ?.....	162
5.1.6.2	La zone d'habitat Holzackerfeld.....	163
5.2	<i>Ensisheim – Liaison routière RD310 A35 – ZAID –</i>	167
5.2.1	Contexte géomorphologique.....	168
5.2.2	Contexte archéologique.....	169
5.2.3	Prospection magnétique sur le tracé de la RD201 – liaison routière.....	169
5.2.3.1	La détection du groupe d'anomalies centrales : les indices d'un site.....	172
5.2.3.2	Détection de structures fantômes.....	174
5.2.3.3	Structures profondes, fantômes magnétiques ?.....	175
5.2.3.4	Mesures de susceptibilité magnétique en forage.....	177
5.2.3.5	Détection de chablis, cohérence archéologique.....	179
5.2.4	Prospection magnétique sur la ZAID – Ensisheim Réguisheim.....	180
6	LES SITES DE PLAINE – RIEDS ET PLAINE D'INONDATION.....	184
6.1	<i>Houssen – Ostheimerweg -</i>	184
6.1.1	Contexte géologique et stratigraphique.....	184
6.1.2	Contexte archéologique.....	185
6.1.3	Résultat géophysique.....	186
6.2	<i>Roeschwoog – Am Wasserturm -</i>	188
6.2.1	Contexte géomorphologique.....	189
6.2.2	Contexte archéologique.....	189
6.2.3	Etude de la nécropole.....	191
6.2.3.1	Cartographie magnétique de la nécropole.....	191
6.2.3.2	Mesure de susceptibilité sur la surface décapée.....	193
6.2.4	Etude de l'habitat.....	193
6.2.4.1	Prospections magnétiques sur la fouille de l'habitat.....	193
6.2.4.2	Mesures de susceptibilité magnétique et estimation de la dépendance fréquentielle et de la viscosité magnétique.....	196
6.2.4.3	Etude de l'extension du site d'habitat.....	200
6.2.5	Conclusion.....	203
6.3	<i>Horbourg-Wihr – Kreuzfeld 2 –</i>	204
6.3.1	Contexte géomorphologique.....	205
6.3.2	Contexte archéologique.....	206
6.3.3	Les données géophysiques.....	207
6.3.3.1	Résultats généraux.....	207
6.3.3.2	Discussion sur l'origine des anomalies linéaires.....	208
7	LES SITES DE PLAINE – LES DEBOUCHEES DE VALLEES.....	212
7.1	<i>Dambach-la-Ville – Plateforme Départemental d'Activité (tranche 2)</i>	212
7.1.1	Contexte géomorphologique.....	212
7.1.2	Contexte archéologique.....	214
7.1.3	Discussion géophysique.....	215
7.2	<i>Soultz – Florival –</i>	219
7.2.1	Contexte géologique.....	219
7.2.2	Contexte et découvertes archéologiques.....	220
7.2.3	Résultats géophysiques.....	221
7.2.3.1	Prospection hors emprise.....	221
7.2.3.2	Prospection sur surface décapée.....	225
8	SYNTHESE DES OBSERVATIONS RELATIVE A L'ETUDE GEOPHYSIQUE DES SITES ARCHEOLOGIQUES ALSACIENS	229

8.1	<i>Les spécificités géomorphologiques</i>	229
8.2	<i>Les spécificités archéologiques</i>	229
8.3	<i>Les spécificités de l'environnement humain</i>	230
PARTIE III : STRATEGIE DE MISE EN ŒUVRE EN ARCHEOLOGIE PREVENTIVE :		231
ASPECTS METHODOLOGIQUES ET PRATIQUES		231
1	INTRODUCTION	232
2	HORS EMPRISE	233
2.1	<i>Les limites d'emprise</i>	233
2.1.1	Les limites d'emprise pour les projets linéaires	233
2.1.2	Ses conséquences sur les limites de fouille	234
2.1.3	Les limites d'emprise des projets d'aménagements	236
2.2	<i>Le site dans son territoire</i>	237
2.2.1	Le contexte environnemental du site	237
2.2.2	Caractériser l'extension du site	238
2.2.3	Une approche spatiale territoriale et intersite	240
3	LA RECONNAISSANCE DES FANTOMES GEOPHYSIQUES : DES MESURES SUR SURFACE DECAPEE A L'ETUDE DE LA STRATIGRAPHIE	242
3.1	<i>Les structures fantômes</i>	242
3.1.1	La nature des fantômes magnétiques	242
3.1.2	Les origines des contrastes géophysiques	244
3.1.3	Etude des fantômes géophysiques	245
3.2	<i>Les niveaux de sol et stratigraphique fantômes</i>	246
3.2.1	Caractéristiques physiques des niveaux archéologiques	246
3.2.2	Etude géophysique des niveaux archéologiques	247
3.2.2.1	Le sondage électrique	247
3.2.2.2	La diagraphie	248
3.2.2.3	La reconnaissance par mesure de susceptibilité magnétique	248
3.2.2.4	La reconnaissance en prospection magnétique	249
3.3	<i>Les études sur surface décapée</i>	250
3.4	<i>L'assimilation de l'information géophysique</i>	251
3.4.1	Considérations pratiques	251
3.4.1.1	Quand intervenir ?	251
3.4.1.2	Le problème des bermes	251
3.4.1.3	Les clous !	251
3.4.2	Intégration des structures fantômes dans la démarche archéologique	252
3.4.2.1	La corrélation spatiale entre les anomalies et les structures	252
3.4.2.2	La corrélation entre les anomalies et le matériel archéologique	253
3.4.2.3	La corrélation avec d'autres analyses	253
3.4.2.4	Prévoir les fantômes géophysiques ?	255
3.4.3	Estimer la présence de structures fantômes après décapage	255
3.5	<i>Conclusion</i>	256
4	LA PROSPECTION GEOPHYSIQUE EN DIAGNOSTIC : UN OUTIL DE DETECTION ?	257
4.1	<i>L'apport de la géophysique</i>	257
4.1.1	La vision générale du site	257
4.1.2	La localisation des structures isolées	258
4.1.3	L'extrapolation des structures entre les tranchées	260
4.1.4	La détermination de l'extension du site	262
4.2	<i>Les limites de la géophysique</i>	263
4.2.1	Les variations de faciès géomorphologique	263
4.2.2	L'influence des paramètres extérieurs	265

4.2.3	Différence entre le nombre de structures et le nombre d'anomalies	266
4.2.4	L'interprétation conjointe des données archéologiques et des observations de terrain – mise en évidence des limites théoriques pour chaque méthode	267
4.3	<i>L'utilisation et la mise en œuvre de la géophysique.....</i>	268
4.3.1	Implantation des tranchées et de leur impact sur la caractérisation des vestiges archéologiques	268
4.3.2	La gestion d'implantation des tranchées : entre impact et préservation ...comment optimiser l'implantation des sondages ?	270
4.3.3	Peut-on diminuer le nombre de tranchées à l'aide de la géophysique ?.....	271
4.3.4	Comment faire intervenir la géophysique dans le cadre du diagnostic ?	272
4.3.5	Comment prévoir l'efficacité d'une prospection ?.....	273
4.3.6	Comment intégrer efficacement les résultats de prospection ?.....	274
4.4	<i>La prospection géophysique dans la phase du diagnostic... un premier bilan</i>	275
CONCLUSION		277
1	FAUT-IL CHANGER LES PRATIQUES ACTUELLES : LE PROBLEME DES FANTOMES ?	278
2	CONTRAINTES ET PRATIQUE DE LA GEOPHYSIQUE.....	278
3	DE LA SAUVEGARDE PAR L'ETUDE A LA GESTION DES SITES	280
4	ACCROITRE L'EFFICACITE DES DIAGNOSTICS EN PRECISANT L'ANALYSE ARCHEOLOGIQUE.....	282
5	ARCHEOLOGIE DES SITES, ARCHEOLOGIE DANS LA LONGUE DUREE : MODELE ET PREVENTION.....	284
6	L'INTERET DANS LE CADRE DE LA GESTION DES PLANS LOCAUX D'URBANISME.....	285
7	LA CONSERVATION DU PATRIMOINE.....	286
8	DES SOLUTIONS COMMUNES	288
BIBLIOGRAPHIE		289
TABLES DES FIGURES		303

REMERCIEMENTS

Pour commencer j'aimerais présenter mes sincères remerciements à David Jordan et Jörg Fassbinder, les deux rapporteurs, qui ont bien voulu prêter attention à ce travail de thèse. Je tiens aussi à remercier les examinateurs, Jean-Paul Jacob, Michel Reddé et Christophe Petit pour l'intérêt porté à ce travail.

Je remercie également l'ANRT et le Conseil Général du Haut-Rhin, qui par l'intermédiaire du Pôle d'Archéologie Interdépartemental Rhénan, ont financé ce projet. Mes remerciements vont donc à Charles Buttner, ancien président du PAIR, qui l'a initialement validé.

Merci à Matthieu Fuchs, d'avoir soutenu le lancement de ce projet, et de son investissement pour la géophysique dans la région. Enfin merci à mes responsables successifs, Karim Gernigon, Fabien Delrieu et Philippe Kuchler plus ou moins impliqués dans ce projet, qui m'ont accordé beaucoup de confiance pour me permettre de mener à bien mes prospections. Je tiens à les remercier pour leurs conseils et leurs questions. Merci plus particulièrement à Philippe pour avoir pris le temps de relire ce manuscrit.

Qui de plus légitime qu'Alain Tabbagh pour diriger un travail de recherche en géophysique appliquée à l'archéologie? Il a toujours su faire preuve de patience pour répondre à mes questions, été d'une grande disponibilité, tout en me laissant beaucoup de liberté. Il a su habilement aiguiller cette réflexion, largement enrichie par son expérience et sa connaissance du milieu archéologique. Je tiens à lui présenter mes plus sincères remerciements pour son enseignement scientifique et humain et son soutien. Merci donc d'avoir bien voulu encadrer ce travail.

Merci à Guillaume Hulin, pour m'avoir initié à la géophysique en archéologie. Ce travail est un peu le sien, même s'il ne l'aurait sans nul doute pas mené ainsi. Je le remercie donc pour ses conseils, les longues discussions, et son soutien permanent. Merci d'avoir partagé tes idées et ta façon de voir le monde de la géophysique en archéologie préventive. Pour moi il ne fait nul doute que ta présence dans la discipline permettra de faire avancer bien des choses.

Je tiens aussi à remercier Julien Thiesson qui a toujours fait preuve de patience pour m'expliquer et me réexpliquer le fonctionnement de ses petits, le CS60, le VC100. Il a toujours su prendre du temps pour éclaircir quelques sombres principes théoriques et il a traversé l'infranchissable barrière des Vosges pour m'aider et me guider sur le terrain. Son intérêt pour l'archéologie a sans nul doute été un gage de la réussite de plusieurs expériences.

La géophysique en archéologie ne peut être l'œuvre d'une seule et même personne. Elle associe un géophysicien à un archéologue. C'est de lui que va dépendre la réussite de la collaboration.

Les nombreux archéologues rencontrées au PAIR, m'ont beaucoup appris, fait preuve d'ouverture et porté un fort intérêt à ces méthodes. Merci donc à Fabrice Reutenauer, Félix Fleischer, Agnieszka Koziol, Alexandre Bolly, Christian Peter (le rouffachois !) grand sage mais bon vivant. Merci à Thierry pour ses nombreuses et longues discussions sur la protohistoire, la musique, le cinéma... Merci à Antoine Ferrier, Sébastien Chauvin, et Florian Bonvalot. J'ai rarement pu mener une approche interdisciplinaire aussi poussée qu'avec vous et les conclusions de ce travail trouvent leurs origines dans nos discussions, quelques vinyles, un concert... Pourvu que ça dure ! Je remercie aussi tout les autres responsables d'opérations avec qui j'ai pu travailler pour des projets du PAIR, Pascal Flotté, Christophe Croutsch (qui a été d'un soutien psychologique ces dernières semaines assez efficace, question d'expérience !), et Jacky Koch qui malgré de nombreux échecs ne se résigne pas à abandonner la géophysique... c'est beau !

Un grand merci à ceux, sans qui il aurait été difficile de faire tant de prospections, qui ont bravé le froid, le chaud, la pluie et la boue... leur quotidien ! Et qui on souvent fait preuve de beaucoup d'intérêt et de curiosité. Romuald, le cousin de thèse, Nicolas, Delphine, Sébastien, Florian, Karine, Anaïs, Grégoire, et plus particulièrement Cécile, qui a toujours fais preuve de motivation malgré ces longues journées de prospections dans le froid. Merci aux deux stagiaires qui sont passés par là. Marie Hulard qui détient toujours le record de la plus grande surface prospectée, désolé Florian, et Quentin qui m'a été d'une aide précieuse à Soultz. Je vous remercie pour votre motivation et votre bonne humeur.

Un très grand merci à Florian, pour son aide indispensable, son intérêt pour la géophysique et ses discussions toujours sympathiques qui ont égayé toutes ces journées. Merci à mon autre collègue de bureau et géomorphologue Thomas. Merci aussi à Pascal pour son aide en SIG, et à Franck parce qu'il existe. Merci à David, Eric et Isabelle pour leur disponibilité, leur aide et leur sympathie. Merci aux restauratrices, aux collègues du plateau technique, et à tous les autres collègues (Audrey, Claire, Jean-Charles, Nico, Caroline, Agathe, Gaëlle, Emeric, et tous les autres).

J'aimerais présenter mes remerciements à l'équipe du Service Régional d'Archéologie, Marina Lasserre, Marie-Domine Watton, Dominique Bonnetterre et Olivier Kayser. Ils ont toujours soutenu ce travail et m'ont toujours accordé (quelques fois à la dernière minute) leur autorisation de prospections.

Merci aux sisyphiens, anciens profs, Christian, Fayçal, Roger, et tous les autres. Tous les doctorants et aujourd'hui docteur (Rémi, Pauline, Quentin, Sylvain, Gonca, Solène, Amine et Amine, Sihem, Marie) pour leur accueil au laboratoire et leur aide. Un merci particulier à Gaghik que je n'ai croisé que trop peu souvent.

Un grand merci à Claire Brinon, Claire la téméraire. J'aurai envie de te souhaiter beaucoup de courage pour finir ta thèse mais je crois que tu as prouvé que tu n'en avais plus besoin vu tout ce que tu as su braver. Enfin ta motivation a enfin été reconnue. Encore merci pour ton soutien ces derniers mois, nos discussions et nos missions lointaines.

Un grand merci à Marie et Manu qui m'ont toujours ouvert leur porte et accueilli. Un merci tout particulier à Grégoire qui m'a de nombreuses fois hébergé, toujours agréablement, souvent à la dernière minute. Merci à M. Schöringer qui m'a tout simplement donné l'envie de faire de l'archéologie.

On arrive enfin aux choses sérieuses, à ceux qui sont là depuis le début. Je tiens à remercier ma famille. Ils ont toujours fait preuve de patience, d'écoute et de soutien durant toutes ces années. Je leur dois sans nul d'avoir pu mener ce travail à terme. Je tiens à les remercier pour tout ce qu'ils m'ont appris et donné.

Reste celle qui désormais partage ma vie, me soutient, me pousse, me retient, m'aide. Celle donc sans qui ce travail n'aurait pas été possible. Merci donc à toi Anaïs, pour tout ça, pour tout ce que tu as fait, et surtout pour ce que tu es.

INTRODUCTION

1 L'archéologie préventive

L'archéologie préventive peut être définie comme la sauvegarde par l'étude des archives du sol et du bâti. Elle fournit à la recherche archéologique française, un corpus de sites à même de répondre aux problématiques scientifiques et d'avancer des hypothèses fondées quant aux occupations humaines (Demoule, 2004). C'est l'aménagement du territoire dont l'intensité varie en fonction des régions, qui précipite le recours aux archives du sous-sol. 700 km² de terrains sont aménagés tous les ans en métropole, mais seuls 20 % (15 000 hectares en 2005) font l'objet d'études archéologiques dite préventives (40 % en Alsace). Le choix judicieux des terrains prescrits permet cependant la sauvegarde par l'étude d'une part non négligeable du patrimoine archéologique détruit chaque année.

La pluralité des sites et la diversité des contextes d'implantations humaines nécessitent de s'intéresser à l'ensemble du territoire. De fait, les choix dans la prescription du diagnostic ne peuvent se baser sur la seule carte archéologique mais sur la prise en compte du risque de chaque secteur et des problématiques scientifiques (Isarin *et al.* 2009, Kamermans *et al.* 2009). Si celles-ci sont semblables à celles de l'archéologie programmée, le cadre administratif (prescriptions, etc.) de l'archéologie préventive lui impose souvent des contraintes pratiques. Celles-ci permettent certes une homogénéisation globale des règles de travail à l'échelle du territoire français, malgré des nuances propres à chaque prescripteurs, mais diminue aussi les marges de manœuvre. Comme la géophysique n'a pas été d'emblée prise en compte dans ce système, il devient en quelque sorte un frein à son emploi.

Les nombreux aménagements du territoire à la fin des années 70 ont entraîné de multiples destructions, occasionnant une prise de conscience collective des dommages portés au patrimoine archéologique. En amont de certains aménagement, l'Etat a alors très ponctuellement recourt à une archéologie dite de sauvetage qui n'a pris le nom d'archéologie préventive qu'en 2001, date à laquelle elle s'est dotée d'un cadre législatif et d'une organisation institutionnelle -l'Inrap-. Les interventions d'urgence ont laissé place à des opérations définies en amont des projets (Demoule 2004). En 2003 l'archéologie préventive s'ouvre aux concurrences tant publiques que privées. En Alsace, le centre départemental du Bas-Rhin se dote de la compétence de l'archéologie préventive dès 2005. Très vite, il fusionne avec le service archéologique du Haut-Rhin pour former le PAIR, Pôle d'Archéologie Interdépartemental Rhénan en 2007. Soutenu directement par les acteurs politiques locaux, il mêle archéologie préventive et assure une mission de médiation culturelle, d'inventaire et de sauvegarde du patrimoine, tâches en partie partagées avec le Service Régional d'Archéologie (Andrieux 2005).

La loi portant sur l'archéologie préventive est modifiée en 2003 et 2009 suite à l'accélération des grands programmes de construction et d'investissements publics et privés (Schlanger et Rosenbach, 2009). Les conséquences de ces modifications sont directement perceptibles dans l'allègement des contraintes pour les aménageurs et la détérioration des conditions d'étude du patrimoine : par exemple, sur la LGV Rhin-Rhône, les zones en forêt, qui auraient nécessité des

moyens mécaniques lourds de déforestation si on avait voulu appliquer les mêmes méthodes de diagnostic qu'en terrain découvert, ne sont sondées que par une tranchée unique large de 2 m avec des fenêtres complémentaires possibles sur une largeur de 30 m, sur un tracé large lui de 100 m. Malgré une prospection LIDAR, la probabilité de découverte de vestiges enfouis est alors faible (Blancquaert 2006). Une vigilance toute particulière est donc nécessaire aux maintiens de protocoles permettant l'étude du patrimoine dans des temps où les restrictions budgétaires commencent à induire des allègements des contraintes.

2 Les méthodes archéologiques : Un frein à l'utilisation de la géophysique ?

L'approche actuelle bipartite - diagnostic-fouille -, remplace l'approche tripartite négociée - prospections-évaluation-fouilles - d'avant 2001 (Daugas 1994). Cette répartition des responsabilités entre le fouilleur et l'aménageur, ne laisse plus place à une phase de reconnaissance préalable globale bien que non exhaustive, tâche normalement assurée par le SRA, mais délaissée car en sous-effectif. Elle explique aussi en partie les difficultés rencontrées quant à l'utilisation de la géophysique en archéologie préventive.

« Le diagnostic a pour but de détecter et de caractériser d'éventuels vestiges archéologiques, d'en déterminer la nature, la géométrie (étendue et profondeur), la taphonomie, le milieu sédimentaire, le potentiel environnemental, la stratification, la datation et l'état de conservation » (CNRA 2009). C'est « un acte fondamental pour la discipline, clé de voûte de toute politique en matière d'archéologie préventive ». S'il faut n'en choisir qu'une la méthode la plus efficace pour détecter exhaustivement les vestiges archéologiques dans des contextes très variées est celle des « sondages systématiques » (Blouet 1994, Talon 2004), pratique qui demeure une exception dans l'espace européen (CNRA 2009). Elle peut être mise en œuvre selon diverses modalités (décapage étendus, tranchées à intervalles réguliers) qui doivent être « guidées par une réflexion scientifique ». L'idéal est d'adapter le mode opératoire à chaque opération, de l'étude documentaire préalable à l'ouverture des tranchées.

Les méthodes d'approches utilisées en fouille peuvent être assez variées (Demoule 2009). En fonction des sites et des contextes, il peut être alors plus ou moins difficile d'intégrer la prospection géophysique dans l'étude, non que son intérêt soit limité mais plutôt parce que ses potentialités sont souvent mal connues. Les archéologues, en premier lieu les prescripteurs des services de l'Etat, n'y ont pas été formés mais il serait tout aussi facile de trouver des géophysiciens peu au fait des problématiques archéologiques. Cet état de fait est extrêmement préoccupant car il bride l'évolution des pratiques. La prospection géophysique, non efficace à 100% n'est donc que très rarement stipulée dans le cahier des charges et de fait dans le projet de fouille, le coût des expérimentations ne devant pas être supporté par l'aménageur. Sur certaines fouilles, assez importantes où une part du budget peut être réservé pour d'éventuels imprévus (découvertes fortuites, moyens supplémentaires nécessaires aux études, etc.), des essais sont exceptionnellement réalisés.

3 Historique de l'utilisation de la géophysique en archéologie préventive

Le concept d'archéologie préventive est donc très récent, admis comme telle depuis une dizaine d'années. La prospection géophysique, apparue dès le début du XX^{ème} siècle en France et appliquée à l'archéologie dès les années 50, voit à cette époque sa mise en œuvre dépendre totalement du choix de l'archéologue et des conseils délivrer par la Direction des Antiquités (Hesse 2000). Y avait-il une politique, avant l'avènement en 2001 de l'archéologie préventive, quant à l'emploi de la prospection en général et de la géophysique en particulier dans l'archéologie de sauvetage ? La réponse à cette question est double.

Pour les années 70, parmi les initiatives locales menées pour défendre des sites, certaines ont employé l'outil géophysique avec succès. Ce fut le cas pour le site d'Argentomagus (Indre) en 1972 : sur la preuve d'une cartographie par la méthode électrique d'une partie du plan de l'agglomération, le docteur Allain, Directeur des Antiquités, a obtenu du préfet de l'Indre l'arrêt d'un projet de lotissement. Ce fut aussi le cas du site de Saint-Romain-en-Gal où le préfet de Région fit procéder à une prospection complète du site avant de décider des aménagements à y réaliser (Hesse *et al.* 1978). A cette époque cependant, le Conseil Supérieur de la Recherche Archéologique a émis un avis défavorable à la mise en place en France d'un service de prospection archéologique analogue à ce qui existait depuis une dizaine d'années à l'English Heritage en Angleterre ou dans les Länder de Rhénanie du Nord -Westphalie et de Bavière en Allemagne fédérale (Becker 1983). Privé d'une capacité d'intervention dans de courts délais, la prospection géophysique n'a pu occuper qu'une place minimale correspondant à quelques opérations ponctuelles tant dans les années 1980 que dans les années 1990 malgré la stabilisation en 1985 d'un archéologue contractuel sur un poste dédié à la prospection rattaché à la Sous Direction de l'Archéologie, occupé par G. Ducomet. Les diagnostics archéologiques réalisés à la fin des années 80 ont été accompagnés de réflexions méthodologiques sur la détection des sites (Ferdrière 1994). L'approche géophysique à l'image des autres moyens de prospections, a été volontairement écartée au profit des sondages systématiques plus à même de révéler l'exhaustivité des vestiges par des méthodes alors déjà maîtrisées par les archéologues de terrain.

Parmi les quelques études réalisées alors, on peut citer celle conduite sur la LGV sud-est (Ducomet et Druelle 1996, Réthoré 2002, Martin 2002), les méthodes électrique et magnétique y ont été mises en œuvre sur plusieurs sites avant diagnostic suite à des découvertes en prospection pédestre ou pour estimer l'extension latérale de sites reconnus sur le tracé. Le projet du TGV Sud-est était cependant un projet particulièrement conséquent et une équipe de prospection réduite à une personne ne pouvait être adaptée à un projet de cette ampleur. Le nombre trop limité de ces études ne pouvait pas non plus encourager leur intégration dans la méthodologie, permettant de diagnostiquer la totalité d'un tracé.

L'expérience menée en 1995 sur le parcours de l'autoroute A77 connut un déroulement très différent. Elle fut financée par la société SAPRR en amont de l'opération de diagnostic (sans que cela

réduise la contribution financière de la société à ce dernier). Après un premier test, en sous-bois par mesure à large maille de la susceptibilité magnétique, qui a permis de découvrir un important groupes de ferriers (sites qui se démarquent par ses propriétés géophysiques remarquables) et de décider de dévier l'autoroute pour éviter une fouille trop onéreuse (Dabas 1999b), elle a été poursuivie plus au sud sur un tronçon de 15 km et a intégré dans un premier temps les données de prospection : susceptibilité magnétique, prospections pédestres, analyses pédologiques et photographies aériennes, puis dans un second temps la cartographie géophysique précise de quelques sites à partir de ces premiers indices, le tout compilé dans un SIG (Dabas 1999a). Alors que le premier test avait été réalisé dans le cadre d'un laboratoire CNRS, le second l'a été dans le cadre d'une société de droit privé constituée à cette occasion. Cette étude avait été validée par une autorisation de la CIRA (septembre 1995). La confrontation promise par le SRA et à laquelle l'AFAN s'était engagée vis-à-vis des sociétés d'autoroute, entre les résultats de la prospection menée sur ces 15 km et les résultats du diagnostic par tranchées, n'a pas eu lieu ce qui n'a pas permis de valider les résultats de prospections.

L'intérêt des mesures de susceptibilités magnétiques à large maille pour un balayage d'ensemble d'un grand tracé n'a toutefois pas échappé au directeur de l'AFAN qui a accepté qu'une bourse de thèse sous convention CIFRE entre l'AFAN et le laboratoire Sisyphe débute à l'automne 1997 sur ce sujet (Marmet 2000). Cette propriété physique qui est étroitement liée à l'anthropisation des sols et aux conditions environnementales ayant prévalu lors de la pédogénèse, permet en effet par des mesures à large maille de définir rapidement les modes de mise en valeur des sols et de cerner les limites de certains sites. La caractérisation de l'occupation des sols sur la longue durée ainsi réalisée donne une première estimation du potentiel archéologique mais l'information qu'elle apporte, d'une autre teneur, ne comble pas les lacunes du diagnostic par tranchées (Bats 2001) et la gamme des sites qu'elle permet de détecter risque d'être incomplète. Dans le cadre de la thèse, elle a apporté de précieux résultats sur les tracés de la A89, de la A66 et sur la déviation de Marines (78) où ses apports étaient en parfaite cohérence avec l'analyse morphologique du paysage (Robert, 2000).

Si la prospection géophysique sur les grands tracés n'a jamais été revendiquée par l'Inrap comme un outil à utiliser légitimement avant le diagnostic, le problème que posent les structures fantômes a retenu son attention. On appelle structure fantôme une structure détectée par un contraste sur l'une des propriétés physiques mais indétectable par la vision humaine (la réciproque existe bien sûr). Vérifier l'absence de structures fantômes sur les surfaces décapées pour identifier des structures et niveaux archéologiques (Fröhlich 2005, Hulin à paraître) est impératif si l'on veut conduire la fouille le mieux possible. Les études qui portent volontairement sur la reconnaissance des structures fantômes datent de moins d'une dizaine d'années. Le terme de *magnetic ghost* sert pour la première fois à désigner des processus sédimentaires - invisibles à l'œil nu mais mis en évidence par des mesures géophysiques – pour une étude de sépultures anglo-saxonne (Linford 2004). Ces mesures sont associées à des analyses en laboratoire et renouvèlent la perception que l'on a des anomalies géophysiques.

Des mesures magnétiques ont été réalisées plus récemment, en amont d'un aménagement routier en Allemagne, sur des maisons rubanées, avant et après décapage. Les prospections ont révélé le plan complet du bâtiment néolithique, tandis que la fouille n'en avait révélé qu'une partie (Fröhlich 2005). Les toutes premières mesures ont été réalisées en surface, puis des mesures complémentaires de susceptibilité magnétique sur surface décapée sont venues préciser les observations de terrain et prouver l'existence de structures invisibles. Sur un autre site, dans le cadre du projet Canal Seine-Nord Europe, toujours daté du néolithique, la prospection a détecté un niveau archéologique invisible corrélé au plan d'un bâtiment sur poteaux. Des mesures magnétiques à maille fine sur surface décapée ont été combinées aux résultats de la fouille et aux cartographies de phosphates pour établir le plan d'un bâtiment difficilement identifiable par les seules observations de terrain et émettre certaines hypothèses sur la fonction de celui-ci (Hulin à paraître). Ces quelques exemples ne suffisent pas à expliquer l'origine des fantômes géophysiques ni à quantifier leur récurrence sur les sites. Loin de comprendre l'ensemble des mécanismes en jeu pour identifier ces structures, cette étude a pour but de synthétiser les observations réalisées sur les différentes opérations pour montrer que les structures fantômes sont bien plus nombreuses que ce que l'on pouvait imaginer jusqu'à ce jour. Seule l'association des prospections et de la fouille a permis de les révéler.

L'apport de la géophysique « en limite d'emprise » est un autre aspect important de l'archéologie de sauvetage ou préventive qui peut être d'un poids déterminant dans l'interprétation des vestiges observés sur une emprise et donc sur la problématique scientifique à retenir pour le site considéré (Ghesquière *et al.* 2011). Quelques rares opérations de diagnostic ont permis d'associer fructueusement la prospection géophysique et l'archéologie préventive. Sur le site de Dambach (Schneikert 2007), l'aimantation remarquable des structures (fours) qui les rend très faciles à identifier en géophysique (aucune pollution non visible n'ayant été identifiée) a permis une analyse et une interprétation des résultats par le fouilleur. Le problème est tout autre pour des structures moins fortement contrastées, de plus faible volume ou situées dans des terrains où le rapport signal/bruit devient très faible. Une complémentarité évidente entre sondage et géophysique n'est donc pas courante, cela étant amplifiée par des analyses lacunaires, soit par peur de commettre des erreurs d'interprétation, ou au contraire par confiance excessive dans les images produites par les prospections.

On est aujourd'hui en mesure de traiter de grandes surfaces dans des temps très courts même si les techniques mises en œuvre nécessitent de gérer de grandes masses de données. Le risque de sous-interprétation est alors important car on s'intéresse d'abord aux formes du paysage et aux structures majeures. Ne pas réaliser d'interprétation critique détaillée peut être encore plus préjudiciable sur les grandes surfaces où la variabilité de l'efficacité est conséquente (Campana et Dabas, 2011). Un traitement et une interprétation très soignée de l'information géophysique restent primordiaux, tout comme la prise en compte des limites des outils et des potentialités de chacun au regard des objectifs poursuivis : il faut au-delà de chaque développement technique maintenir une

réflexion sur la méthodologie et les pratiques de mise en œuvre. S'ajoute à ce problème d'effet induit par le cadre administratif des dérives induites par le découpage des tâches en une série de prestations traitées indépendamment. Celles-ci ne favorisent pas l'interdisciplinarité et décourage tout approfondissement dans l'archéologie des grandes surfaces.

4 Problèmes, problématiques et propositions

Au terme de ce rapide historique, peut-on dire aujourd'hui que le cadre législatif de la fouille et du diagnostic soit un frein à l'application de la prospection géophysique en archéologie préventive ? Dans ce cadre précis, soumis à prescription et à un cahier des charges de l'Etat, il n'existe que deux moyens pour recourir à la prospection géophysique. Pour le diagnostic :

- L'archéologue fait le choix de l'intégrer dans sa démarche ce qui pose le problème de son financement, qui doit se faire au détriment d'une autre approche (ouverture mécanique, autres types d'analyses). Dans ce cas, le glissement du coût est mal supporté si l'apport d'informations est trop faible. Dans le cadre de ce travail c'est cette option qui a été privilégiée.
- Le financement est assuré par l'aménageur, qui comme pour tout coût supplémentaire attend en retour un bénéfice dans le cadre de son projet. Dans ce cas, l'apport de la prospection géophysique risque de ne pas être intégré à l'analyse archéologique d'ensemble.

D'aucuns se plaisent aussi à opposer les deux approches pourtant complémentaires, et à affirmer que la prospection n'aurait aucune utilité puisqu'elle ne peut se substituer complètement au diagnostic par excavations (Blancquaert 2006), ou que le diagnostic par sondages systématiques est une aberration pour l'analyse et la reconnaissance archéologique d'un projet d'aménagement (Campana et Dabas 2011). Ces comparaisons ne sont que trop superficielles et la réponse à la question de l'emploi de la géophysique dans la phase du diagnostic est sans nul doute moins triviale.

C'est donc en essayant de faire face à ces différents problèmes que nous avons abordé la mise en œuvre de la géophysique en archéologie préventive en contexte rural, par le biais d'une convention CIFRE-CRAPS (entre l'ANRT, le PAIR et l'UPMC). Cette évaluation n'est possible qu'après un rappel des principes de bases : propriétés physiques qui rentrent en jeu, fonctionnement des appareils, etc. Il est effectivement nécessaire de clairement les définir tant pour l'élaboration des protocoles que des problématiques. Après avoir présenté le contexte régional, car l'Alsace se démarque par ses spécificités tant météorologiques et géologiques qu'humaines, nous analysons les douze sites les plus pertinents, parmi la vingtaine étudiée, tant pour cerner les avantages que les limites de la méthode. Ces douze sites ont été choisis car ils sont les plus représentatifs des différentes problématiques abordés ici, des différents contextes géomorphologiques et permettent de ne pas présenter plusieurs exemples similaires. Ils nous permettent de dresser une sorte de synthèse des protocoles envisagés, de la plus-

value de la mise en œuvre de la géophysique et des problèmes rencontrés (les problèmes liés à la mise en œuvre de la géophysique en milieu urbain (Panissod et Dabas 1999) ne sont pas traités ici). La synthèse est abordée selon trois axes qui gravitent autour du schéma classique diagnostic/fouille : d'abord la prospection hors emprise qui relève de l'archéologie non-préventive par définition mais qui s'intègre au contraire à l'archéologie au sens large du terme, puis le problème des fantômes géophysiques (structures et niveaux), essentiellement sur les surfaces décapées où il est plus opportun de les révéler, enfin l'intégration de la géophysique dans la phase du diagnostic, comme une méthode complémentaire aux pratiques existantes. Ces réflexions nous permettent de proposer une utilisation plus générale où la prospection géophysique est présentée comme un outil qui, au même titre que d'autres méthodes de prospections, permet d'envisager une gestion du patrimoine archéologique différente mais totalement complémentaire avec les pratiques et les avantages de l'archéologie préventive telle qu'elle est mise en œuvre aujourd'hui.

**PARTIE I : THEORIE,
METHODOLOGIE ET INSTRUMENTATION**

1 Les propriétés électriques

1.1 La conductivité électrique

La conductivité électrique - capacité des matériaux à laisser passer le courant - s'exprime en siemens par mètre, $S.m^{-1}$. Elle n'a de réalité qu'en présence d'un champ. Elle est définie par la loi d'Ohm comme le facteur de proportionnalité entre la densité de courant J et le champ électrique E . Son inverse, la résistivité électrique - résistance d'un élément de section S unitaire et de longueur L unitaire - s'exprime en Ohm.m. Plusieurs paramètres physiques peuvent agir directement ou indirectement sur les valeurs de conductivités, leur identification est nécessaire pour comprendre les variations de la résistivité observées sur le terrain (fig. 1).

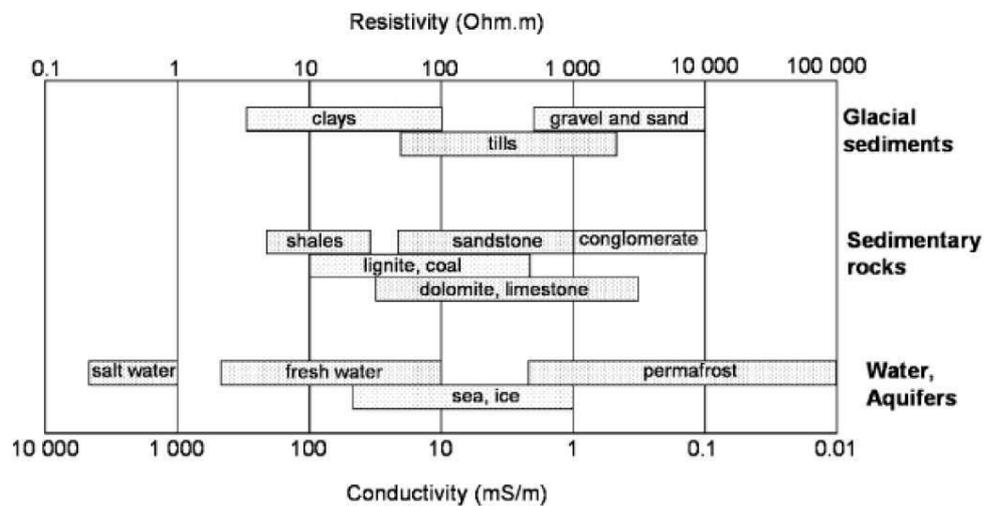


Figure 1 : Classes de résistivité de roches et solution (Palacky 1987)

La conduction électrique dans le sol est essentiellement électrolytique, c'est-à-dire basée sur le déplacement d'ions dans l'eau interstitielle et sur la zone externe de la double couche présente sur les parois des grains solides. La capacité d'échange cationique de la solution et la concentration ionique de la solution, sa force ionique, définissent la quantité totale de charges mobilisables tandis que la température influe sur la mobilité de ces charges. La surface spécifique et donc la teneur en argile gouverne l'importance relative des mouvements de charge sur les parois des grains et leur influence sur la résistivité. Ainsi, la température, le degré de saturation en eau, la porosité et la surface spécifique des matériaux interviennent directement ou indirectement sur ces mécanismes de déplacement de charges. Dans le cadre de cette thèse la résistivité des terrains étudiés est en premier lieu dépendante de la teneur en argile.

1.2 Paramètres physiques

1.2.1 La concentration ionique de la solution des sols

La conductivité, dite volumique, souvent utilisée pour quantifier la salinité (Job, 1995), est fortement dépendante de la concentration ionique de la solution du sol. La conductivité de l'électrolyte augmente avec la concentration du soluté suivant la forme :

$$\sigma = f(c_1v_1 + c_2v_2 + c_3v_3 + \dots + c_nv_n)$$

où v représente la mobilité des ions et c la concentration. Cette fonction peut prendre une forme non linéaire suivant le type d'ions en présence et la concentration du soluté. La taille et la nature des ions porteurs des charges ont une forte influence sur la mobilité et donc sur la conductivité. Cette dépendance est en étroite relation avec la viscosité de la solution qui modifie la mobilité des charges.

Dans notre zone d'étude les variations de salinité des solutions électrolytiques en présence dans le sol sont très faibles et les variations de la conductivité sont peu représentatives de ce paramètre.

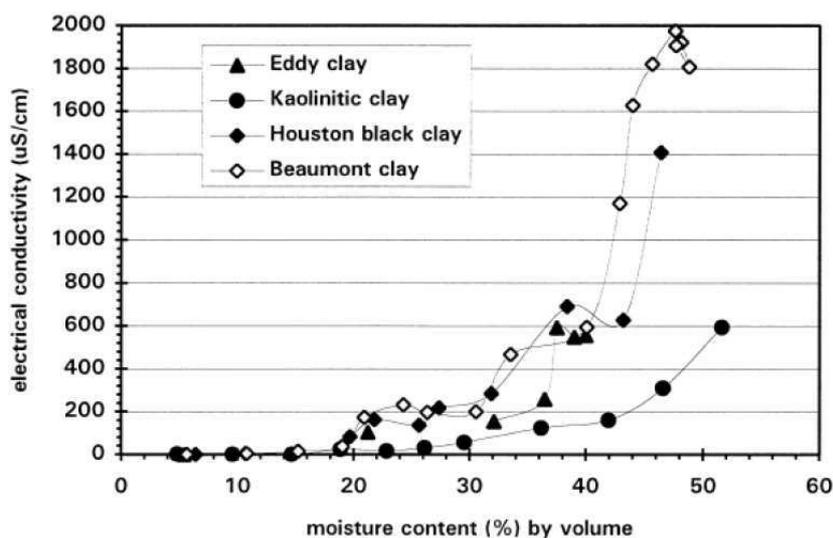


Figure 2 : Conductivité électrique de sols argileux en fonction de la teneur en eau volumique et de la teneur en argile (38 % Beaumont clay, 35 % Houston back clay, 14 % Eddy et 20 % Kaolinitic clay (Saarenketo 1998)

1.2.2 La fraction argileuse

Dans les cas où les concentrations ioniques dans l'eau interstitielle sont faibles, c'est-à-dire dans les milieux superficiels continentaux, la conductivité va d'abord dépendre de la surface

spécifique donc de la distribution en taille de grain. Cette dépendance est due aux propriétés des interfaces eau/surfaces des particules. La conductivité correspondante, dite surfacique, est contrôlée par la double couche ionique : les surfaces des particules chargées négativement attirent des ions compensateurs de la solution pour établir l'électro-neutralité. Il est cependant nécessaire qu'il y ait une teneur en eau volumique minimum pour entraîner les échanges de surfaces : au-delà de 20% de teneur en eau volumique, la conductivité électrique croît avec la part argileuse du sédiment (Saarenketo1998).

Sans eau, le sédiment argileux peut se comporter comme un parfait diélectrique (fig. 2). Par ailleurs, l'association de la matière organique du milieu avec la part argileuse du sol par la formation d'un complexe argilo-humique a une forte influence sur les propriétés électriques encore mal expliquée (Seladji 2010).

1.2.3 La température

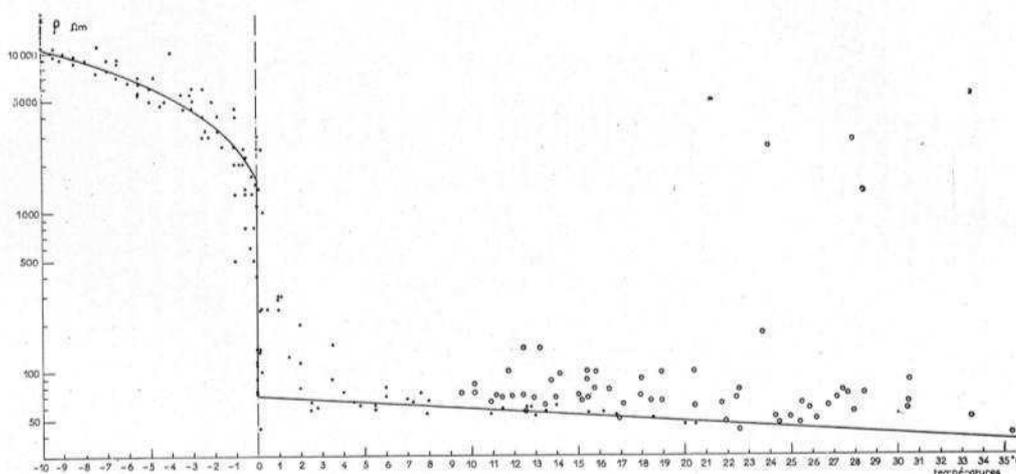


Figure 3 : Loi de variation en fonction de la température d'une argile à l'état saturé (station fixe de Garchy) (Hesse 1966)

Une augmentation de la température a trois effets sur la conductivité du sol : elle favorise la mobilité des cations compensateurs de la double couche électrique (Seladji 2010), entraîne une diminution de la viscosité de la solution électrolytique et modifie la quantité de sels dissous dans la solution. A température ambiante, la relation qui relie la conductivité à la température est quasi-linéaire. Pour une solution de chlorure de sodium, le coefficient est : $\alpha=0.022$ par degré Celsius. Pour les autres types d'ions elle est quasi-similaire et suit la forme :

$$\sigma_{\theta} = \sigma_{n(20^{\circ}\text{C})} \times (1 + 0.022(T - 20))$$

La formule traduit de façon satisfaisante des variations de température observées sur la mesure de la résistivité d'un échantillon de sol limoneux remanié et compacté (Beck 2007). En revanche elle n'est pas adaptée pour les sols à une importante fraction argileuse (Besson 2007) où α peut varier significativement. Elle n'est plus vérifiée pour les températures négatives (gel) qui entraînent des transformations physiques de la solution électrolytique. Le graphique 1 rend très bien compte de la dépendance linéaire pour des températures ambiantes (fig. 3), du fort changement à 0° et du comportement très résistant pour les températures négatives. La conductivité du sol étudié prendrait approximativement la forme :

$$\rho = e^{(-A\theta + C)}$$

1.2.4 La teneur en eau

La conductivité électrique augmente avec la teneur en eau et le degré de saturation (Michot 2003). Elle a un effet indirect sur les trois premiers paramètres présentés ci-avant. Il existe une relation quantitative entre résistivité électrique, teneur en eau et degré de saturation (Mc Carter 1984). La résistivité diminue quand le degré de saturation augmente pour une teneur en eau pondérale donnée. La conductivité varie plus fortement lorsque cette teneur en eau est faible.

1.2.5 La loi d'Archie

La résistivité des roches varie en fonction de la taille et de la distribution des pores, elle est donnée par une loi empirique, la première loi d'Archie. Si la roche contient de l'eau interstitielle, la conductivité est plus importante. Cette loi relie la résistivité de la roche, et la résistivité électrique du fluide interstitielle.

$$\rho_r = a\Phi^{-m}S^{-n}\rho_w$$

Avec Φ la porosité totale de la roche, m , a et n , où $n \approx 2$, des constantes, S le taux de saturation en eau et ρ_w la résistivité du fluide (Telford 1976).

1.3 Variabilité naturelle et anthropique de la résistivité électrique

1.3.1 Le climat

Le climat gouverne plusieurs paramètres physiques du sol (température, teneur en eau) modifie directement la résistivité du sol. Les variations climatiques, ou à plus court terme météorologique, peuvent donc provoquer des changements soudains de résistivité (Hesse 1966).

On distingue deux types de variations de la température: les variations diurnes et annuelles. Les variations diurnes ont un impact minime sur la résistivité en profondeur, la chaleur étant transmise dans le sol par des phénomènes de conduction très rapidement amortis. Pour les variations annuelles, on distingue dans le nord de l'Europe deux périodes. En hiver, les sols sont proches de la saturation et l'ensemble des espaces interstitiels est comblé par la solution. En été, le réapprovisionnement en eau se fait épisodiquement et parfois soudainement, ce qui peut entraîner de fortes différences de résistivité sur des temps très courts. L'eau perdue par le sol, l'est par évaporation et on a alors une augmentation de la conductivité électrique de l'eau restante (puisque'il n'y a pas de pertes d'ions). Les variations de température sont peu importantes si la mesure de la résistivité intègre un grand volume de sol, car elles moyennent la température non uniforme de l'ensemble. Ces observations sont particulièrement significatives pour les prospections électriques en hiver, lorsque les niveaux les plus profonds ne dégèlent pas ou en été sur des sols très secs. On observe alors les plus fortes variabilités verticales de résistivité sur un terrain de constitution homogène.

1.3.2 Traitement des sols

1.3.2.1 La végétation

Le rôle des organes souterrains de plantes est particulièrement complexe, et peut modifier les valeurs de résistivité électrique (Amato *et al.* 1998) par deux biais : la modification de la distribution spatiale de l'eau, et les modifications des propriétés physiques du sol (structure, création de macropores, agrégation de particules).

On distingue deux cas :

- Le système racinaire peut entraîner des valeurs de résistivités faibles (fig. 4). Pour les racines jeunes dépourvues d'écorce extérieure la concentration et les échanges ioniques entre la solution du sol et le système racinaire favorisent la circulation du courant électrique le long des racines qui se comportent alors comme des corps conducteurs. La décomposition des racines peut aussi avoir une résistivité très basse
- Le système racinaire peut entraîner une résistivité élevée. Les plantes plus vieilles entraînent un système sous-terrain résistant. Par la création de vides, la décomposition des racines peut aussi entraîner à une augmentation de la résistivité du sol.

Le complexe sol-racine-tronc, assez difficile à appréhender, rend complexe la prévision du comportement de la résistivité électrique. La matière organique a un rôle indirect sur la résistivité, tandis que le prélèvement hydrique et la transpiration des plantes modifient l'équilibre du système puisqu'elle est influencée par la capacité de rétention d'eau (Seladji 2009).

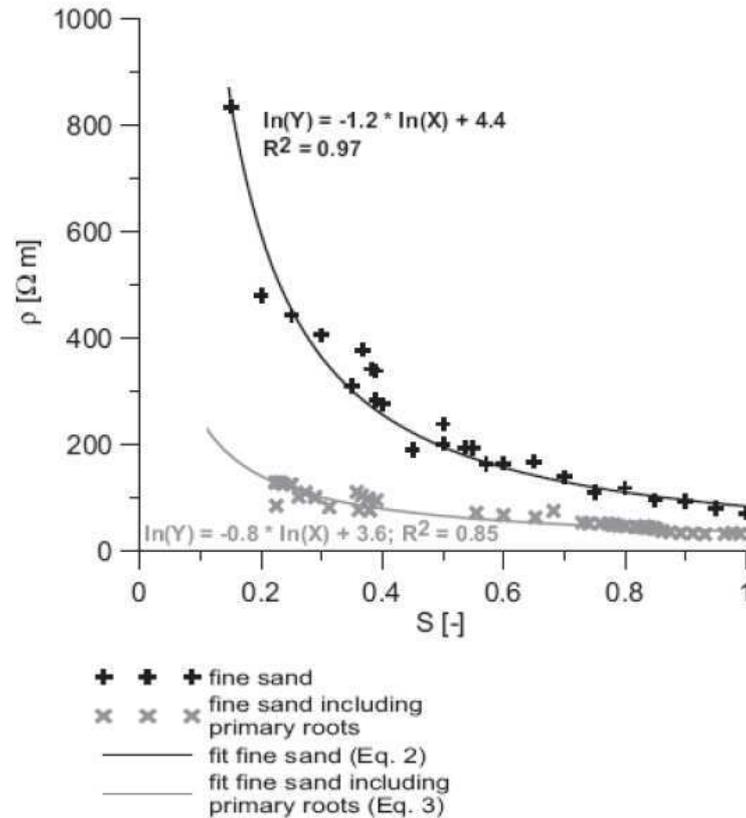


Figure 4 : Résistivité en fonction de la saturation pour des sables fins sans et avec jeunes racines (Werban *et al.* 2008)

1.3.2.2 Tassement et déstructuration du sol

Les labours, technique prépondérante dans les cultures céréalières, permet la préservation de l'humidité des sols par la déstructuration mécanique des premiers décimètres et par la destruction de plantes adventices qui auraient produit une évapotranspiration. Ils modifient la résistivité électrique alors dépendante des variations de masse volumique par la teneur volumique en particules argileuses conductrices. Les effets combinés de la présence de macropores et d'eau expliquent la faible résistivité des sols tassés et la faible conductivité des sols non tassés (Besson *et al.* 2004, Seger *et al.* 2009). La fissuration due aux épisodes de gel-dégel ou aux retraits et gonflements des sols argileux peut également modifier la résistivité électrique des sols, par la formation de vides (Tabbagh *et al.* 2000).

2 Les propriétés magnétiques

2.1 Aimantation induite, aimantation rémanente

2.1.1 La susceptibilité magnétique

La susceptibilité magnétique - capacité d'un matériau à acquérir une aimantation M qualifiée d'induite, sous l'action d'un champ magnétique uniforme, H , de faible intensité – est définie par le rapport (Thompson et Oldfield 1986):

$$\kappa = \frac{\vec{M}}{\vec{H}}$$

κ , la susceptibilité volumique d'un élément est sans dimension. H et M s'expriment en A/m. Pour les mesures en laboratoire, il est plus facile de mesurer la susceptibilité massique, qui ne change pas avec les manipulations d'un échantillon. Elle est définie comme :

$$\chi = \frac{\kappa}{\rho}$$

Avec ρ , la masse volumique, et χ , la susceptibilité massique, qui s'exprime en $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$. La susceptibilité magnétique doit être représentée par un nombre complexe où la partie en phase (réelle) représente la susceptibilité proprement dite et la partie en quadrature (imaginaire) la viscosité magnétique.

Dans le sol, les grains d'oxydes de fer principaux responsables de propriétés magnétiques sont contenus dans la fraction argileuse et orientés aléatoirement. Comme le champ magnétique terrestre n'est pas assez fort pour leur donner une orientation préférentielle, ils ont une aimantation induite assez faible.

2.1.2 L'aimantation rémanente

On appelle aimantations rémanentes toutes les aimantations qui perdurent après que le processus d'acquisition a disparu. Ces processus sont très variés, les principales aimantations que peuvent acquérir les sols et les roches et qui jouent un rôle en sciences de la Terre sont l'aimantation thermorémanente, l'aimantation cristalline et l'aimantation visqueuse. Elles seront décrites ici après un rapide exposé des bases du magnétisme.

2.2 Les comportements magnétiques

La théorie des diamagnétiques et paramagnétiques a été établie par P. Langevin en 1905 puis celle des ferromagnétiques par L. Néel quarante ans plus tard.

2.2.1 Les diamagnétiques

De nombreux atomes et molécules ne possèdent pas de moments magnétiques, ce qui entraîne la formation d'une aimantation induite en sens inverse et colinéaire au champ magnétique appliqué (susceptibilité magnétique négative et très faible, de l'ordre de -1.10^{-5} u.S.I.). L'eau, le bois, les composés organiques et certains minéraux (quartz, feldspath, calcite) sont diamagnétiques. Ce comportement est généralement masqué par des matériaux plus magnétiques.

2.2.2 Les paramagnétiques

Certains atomes présentent un remplissage incomplet des niveaux électroniques provoquant une instabilité énergétique. Il en résulte un moment magnétique élémentaire non nul, susceptible de s'aligner sur tout champ magnétique appliqué, provoquant une faible aimantation induite (susceptibilité magnétique de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} u.S.I.). Ce phénomène réversible est contrarié par l'agitation thermique, la susceptibilité magnétique étant inversement proportionnelle à la température absolue. L'argile, certains métaux et minerais (sidérite, pyrite, chalcopyrite) et de nombreux minéraux (pyroxène, olivine, biotite) sont paramagnétiques.

En l'absence de champ, le moment magnétique des corps paramagnétiques et diamagnétiques est nul. Ils ne peuvent donc présenter d'aimantation rémanente.

2.2.3 Les ferromagnétiques

2.2.3.1 Les ferromagnétiques stricts

Lorsque les minéraux avec une structure cristalline compacte contiennent des éléments de transition (lanthanide, Fe, Fe²⁺, Fe³⁺), les spins (moments cinétiques) libres conservent l'orientation du champ externe auquel le matériau a été soumis. Le corps peut alors présenter une aimantation induite importante et une aimantation rémanente. C'est le cas du fer à température ambiante, d'où a été tiré le nom ferromagnétique. Au-delà d'une certaine température, dite de Curie, l'énergie thermique devient supérieure à l'énergie créée par les moments élémentaires et le corps devient paramagnétique.

Lorsqu'ils passent en-deçà, les moments élémentaires prennent l'orientation du champ externe. Cette température, appelée température de Curie, est caractéristique de chaque matériau ferromagnétique et ferrimagnétique.

2.2.3.2 Les ferrimagnétiques

Lorsque que deux types de moments élémentaires d'intensités différentes existent, ils sont orientés de façon antiparallèle et on parle de grains ferrimagnétiques (fig. 5). Ces grains peuvent avoir une susceptibilité importante ainsi qu'une aimantation rémanente. Les minéraux ferrimagnétiques tiennent une place prépondérante dans le magnétisme des sols (cf. infra). Ce sont des oxydes (magnétite Fe_3O_4 , la maghémite $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$) et des sulfures (la greigite Fe_3S_4) de fer ainsi que de métaux de la série de transition.

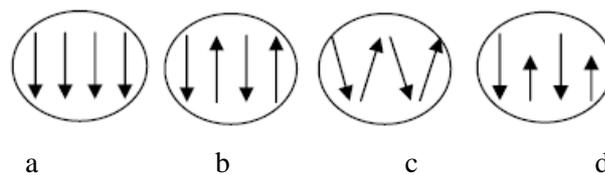


Figure 5 : a, comportement ferromagnétique; b, comportement antiferromagnétique strict; c, comportement antiferromagnétique dévié; d, comportement ferrimagnétique (Thiesson 2007)

2.2.3.3 Les antiferromagnétiques

Pour les matériaux antiferromagnétique on observe une orientation des spins alternée comme pour les ferrimagnétiques, à la différence près que leur intensité est équivalente. Le moment macroscopique résultant est nul par compensation (antiferromagnétique au sens strict) et ils ne sont pas rémanents. L'agitation thermique, comme la structure cristalline peut déranger le parallélisme entre les moments magnétiques. Il en résulte un ferromagnétisme dévié. Les matériaux ont alors un moment magnétique macroscopique, non nul (c'est le cas de l'hématite, cf. infra).

Au sens large, le mot ferromagnétisme désigne à la fois les ferromagnétiques stricts, les ferrimagnétiques et les antiferromagnétiques (stricts et déviés).

2.2.3.4 Les domaines de Weiss

Sur les matériaux ferromagnétiques, l'orientation du moment élémentaire porteur n'est pas toujours identique sur tout le volume de l'échantillon. On définit ainsi le domaine de Weiss comme un volume, où les moments élémentaires ont la même orientation. La frontière entre deux domaines, appelée paroi de Bloch, est caractérisée par la rotation du sens de l'aimantation de quelques atomes vers le sens des moments du domaine voisin (fig.6) (Thompson et Oldfield). Les matériaux granulaires peuvent donc se présenter sous forme de grains monodomaines ou polydomaines :

- Pour les grains polydomaines, la susceptibilité (ou l'acquisition d'une aimantation) va correspondre à un déplacement des parois, augmentant le volume des domaines orientés dans le champ. Ce déplacement des parois de Bloch peut être gêné par les impuretés minéralogiques. Ces grains présentent une aimantation plus faible que celle des grains monodomaines (du fait de la compensation totale).
- Pour les grains monodomaines, la susceptibilité est fonction de la facilité avec laquelle l'aimantation du domaine s'oriente sur le champ magnétique. Plus le domaine, c'est-à-dire le grain, est petit, plus il s'oriente facilement. En revanche plus le domaine sera volumineux plus stables seront les aimantations rémanentes.
- Pour les éléments qui ne possèdent les deux types de grains et ont de ce fait un comportement intermédiaire on parle de pseudo-monodomaines.

La formation de plusieurs domaines n'est possible qu'au-dessus d'une certaine taille critique du grain. Les tailles des grains et donc des domaines sont fortement dépendantes de leur condition de formation.

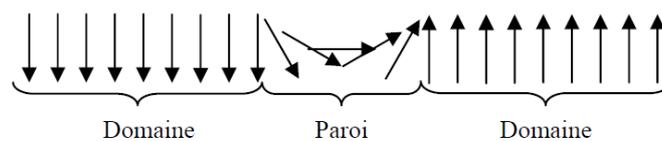


Figure 6 : Rotation progressive des spins à la frontière entre deux domaines d'orientations opposées (Thiesson 2007)

2.2.4 Les superparamagnétiques

Pour les très petits grains monodomaines ferrimagnétiques et antiferromagnétiques, on se rapproche d'un comportement paramagnétique dit superparamagnétique. A température ambiante, les grains s'alignent instantanément sur le champ appliqué et se désorientent, lorsque celui-ci est coupé. Ils n'ont pas d'aimantation rémanente. La limite entre grain monodomaine et superparamagnétique dépend de la taille des grains et de la température. La frontière entre les grains monodomaines très

petits et les grains superparamagnétiques est de l'ordre de 10 nm à température ambiante pour la magnétite (cf. infra).

2.3 Les minéraux porteurs du signal magnétique

2.3.1 La magnétite : Fe_3O_4

La magnétite, ferrimagnétique, contient des ions Fe^{2+} et Fe^{3+} . Certains des atomes de fer peuvent être remplacés par des ions Ti^{2+} , Al^{2+} , Mg^{2+} et Mn^{2+} , on parle alors de titano-magnétiques. Tous trouvent le plus souvent leur origine dans la roche mère. La magnétite peut aussi être formée par la réduction de l'hématite ou de la goéthite (hydroxyde) (fig. 7). Dans les sols, sa genèse est étroitement liée aux conditions d'oxydoréduction du milieu (Le Borgne 1955, Mullins 1974). Dans les milieux anaérobies, comme les gley et les zones humides, certaines magnéto-bactéries peuvent synthétiser la magnétite ou entraîner la réduction de l'hématite sous forme de magnétite monodomaine (Fassbinder et Stanjek, 1994). Si la susceptibilité d'un sol est supérieure à $5.10^{-8} \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$, elle est en général corrélée avec la présence de magnétite dans ce sol (Vodyanitskii *et al.* 1997).

2.3.2 La maghémite : $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$

La maghémite est un oxyde ferrique de même structure cristalline que la magnétite, mais qui ne contient que des ions Fe^{3+} . Elle est représentative des milieux bien aérés, et est considérée comme l'oxyde de fer le plus développé (fig. 7). C'est un minéral qui n'existe pas dans la roche mère non altérée, et qui est lié aux phénomènes d'altération et à la pédogenèse (Mullins 1977). Elle devient instable au-dessus de 250° où elle se transforme en hématite. A basse température, (entre 150 et 250° en laboratoire), elle est formée à partir de l'oxydation de la magnétite et dépend étroitement de sa teneur. Lors d'une chauffe, l'hématite peut se transformer en magnétite, puis elle-même en maghémite (Le Borgne 1955, Graham et Scollar 1976). Enfin dans le cas des sols humides chauffés à 450° (température atteinte lors de la combustion des structures domestiques), la déshydratation de la lépidocrocite peut entraîner la formation de la maghémite (Marmet 2000).

2.3.3 L'hématite : $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$

L'hématite se comporte comme un antiferromagnétique légèrement dévié pour des températures supérieures à -15°C (température dite de Morin). Son aimantation induite est donc faible, mais elle est un porteur potentiel de l'aimantation rémanente. On la trouve dans les terres cuites (Thellier 1938). C'est l'oxyde de fer le plus répandu dans les sols et les formations superficielles

(Foucault et Rouault 1988). On la retrouve dans les roches magmatiques alcalines comme les granites ou les rhyolites. L'hématite est une source pour le développement de formes minérales plus magnétiques sous l'action de facteurs naturels ou anthropiques (fig.7).

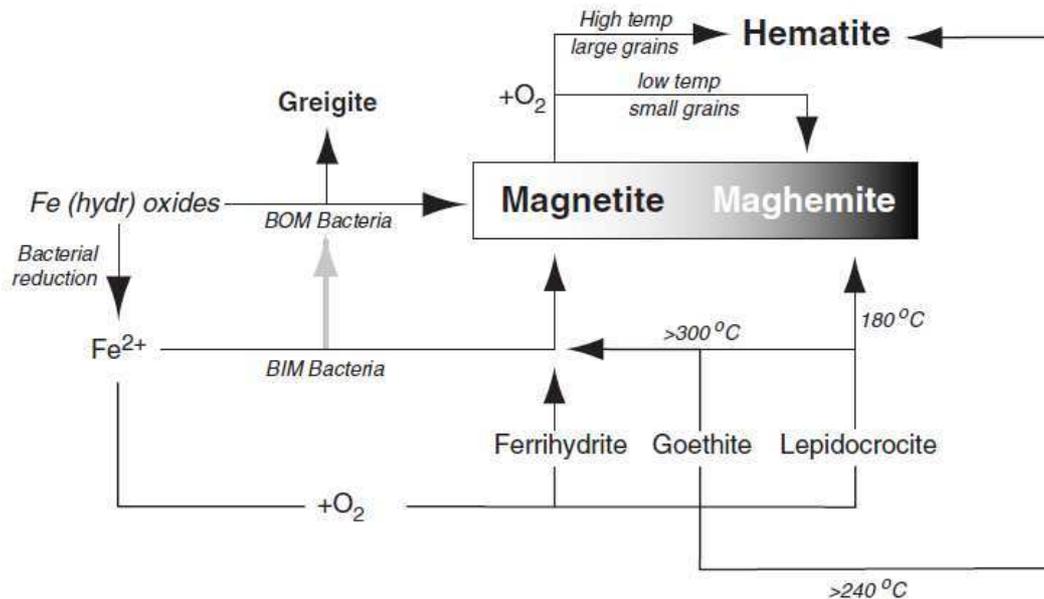


Figure 7 : Schéma des différents chemins menant vers la formation de formes de grains magnétiques (Linford 2006)

2.3.4 La greigite : Fe_3S_4

La greigite - de même forme cristalline que la magnétite - est un minéral ferrimagnétique. On la retrouve dans des sols qui présentent des conditions anaérobies (gley et zones humides), en présence de bactéries, de matière organique et de sulfure de fer (Hoffmann 1992). Elle peut prendre la forme de grains superparamagnétiques (Fassbinder et Stanjek, 1994) ou de monodomains porteurs de l'aimantation rémanente. Elle se forme à partir des sulfures de fer par réduction bactérienne (Freke et Tate 1961) à travers une biominéralisation intracellulaire (Mann *et al.* 1990). Elle présente une forte capacité à modifier le comportement magnétique d'un sol. Un horizon profond contenant de la greigite peut présenter des susceptibilités potentiellement supérieures à celle de l'horizon A (Fassbinder et Stanjek 1994).

2.3.5 La lépidocrocite : γFeOOH

La lépidocrocite est un hydroxyde de fer commun de couleur rouge orangé. On le trouve dans les horizons de battements des nappes phréatiques - horizon Go, caractéristique des gley - où les variations de niveau d'eau font précipiter les ions Fe^{2+} . A température ambiante elle se comporte comme un minéral paramagnétique. Elle se forme à partir de l'altération des silicates de fer. Elle peut

se déshydrater à 250° pour former de la maghémite. C'est donc une réserve importante pour le signal magnétique notamment pour les structures domestiques chauffées à moyenne température (Marmet 2000).

2.3.6 La goethite : αFeOOH

La goethite, minéral de couleur ocre, stable dans les régions humides, est un antiferromagnétique qui possède une rémanence d'origine chimique. Sa formation, favorisée par des conditions acides et des températures modérées, se fait suite à l'altération des pyrites, de la magnétite et des carbonates de fer. La biodégradation de la matière organique entraîne la cristallisation progressive de la goethite. Entre 250 et 400° elle se déshydrate en hématite.

La reconnaissance des grains magnétiques peut présenter quelques difficultés dans le contexte de l'étude qui suit. Il faut en effet pouvoir déterminer la nature chimique des éléments ou réaliser des mesures de propriétés magnétiques en laboratoire (Pétronille 2010, Marmet *et al.* 1999). Les études qui suivent ont été menées sur des périodes très courtes notamment pour les diagnostics et n'ont pas permis d'établir de liens précis entre phénomènes observés et nature des grains magnétiques. La connaissance de leurs relations avec le milieu naturel permet cependant de guider la réflexion.

2.4 Les aimantations rémanentes

Lorsque l'on chauffe les minéraux au-delà de leur température de Curie, ceux-ci perdent leurs propriétés magnétiques et deviennent paramagnétiques. Lorsque la température redescend sous ce même seuil, les grains s'orientent préférentiellement sur le champ magnétique ambiant. Cette nouvelle orientation (macroscopique) est stable et forte. On l'appelle aimantation thermorémanente. L'aimantation rémanente cristalline correspond à l'acquisition d'une aimantation lors de la formation des cristaux. Elle a des caractéristiques très proches de l'aimantation thermorémanente mais a très peu été étudiée dans les sols.

Lorsqu'un élément est plongé durant un temps long dans un champ magnétique, son aimantation peut s'accroître régulièrement au cours du temps : on appelle aimantation induite visqueuse cette aimantation qui vient s'ajouter à l'aimantation induite « immédiate ». Lorsqu'on coupe le champ inducteur cette aimantation va persister tout en décroissant dans le temps, on l'appelle alors aimantation rémanente visqueuse. Les grains magnétiques de petite taille situés à la frontière entre grains monodomaines et superparamagnétiques sont particulièrement sensibles à ce type d'aimantation. On la trouve aussi dans les grains polydomaines.

Lorsque les éléments présentant une aimantation rémanente sont brassés, l'aimantation résultante est fortement diminuée car la somme des aimantations dans des directions aléatoires tend vers zéro (fig. 8). Cette aimantation ne peut donc persister dans les sols au niveau macroscopique lorsque ceux-ci sont perturbés (labour, bioturbation). La mise en évidence d'une aimantation rémanente est alors un marqueur de l'immobilité d'un milieu (Thiesson 2007).

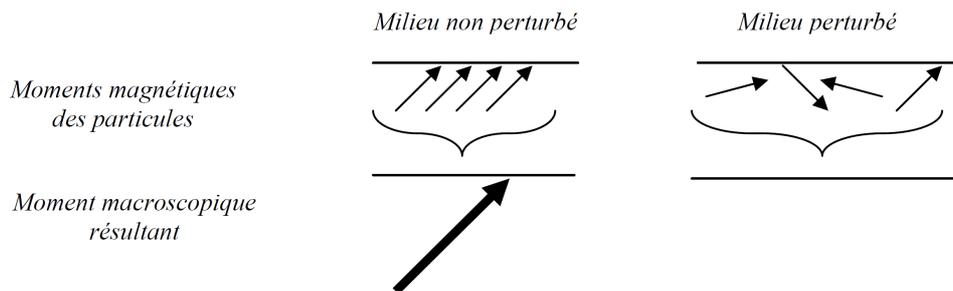


Figure 8 : Influence de la perturbation du milieu sur l'aimantation rémanente macroscopique (Thiesson 2007)

2.4.1 La viscosité magnétique

Pour les ferromagnétiques, lorsqu'on applique un champ magnétique variable dans le temps, une aimantation visqueuse, à la fois induite et rémanente, intervient. Les moments magnétiques vont suivre les évolutions du champ appliqué, par une modification du nombre de grains orientés ou un déplacement de parois de domaines. Ceci ne peut être réalisé qu'avec un retard qui s'exprime par la viscosité magnétique (fig. 9), partie complexe et négative de la susceptibilité magnétique (Dabas et Skinner 1993).

$$\kappa = \kappa_{ph} - i\kappa_{qu}$$

Pour un grain, ce retard est caractérisé par la constante de temps τ (Néel 1949). Néel propose un modèle pour établir τ à partir des paramètres des grains : le volume, la taille, la répartition des domaines et des caractéristiques magnétiques (champ coercitif et aimantation à saturation).

Les premières études expérimentales sur les sols ont été effectuées pour des temps longs entre 100 s et 10^6 s (Le Borgne 1960a). Elles vérifient la théorie de Néel pour ces gammes de temps et mettent en relation la viscosité des grains avec l'estimation de la distribution de taille des grains magnétiques. Les temps courts ont été vérifiés par des mesures en laboratoire (Dabas *et al.* 1992).

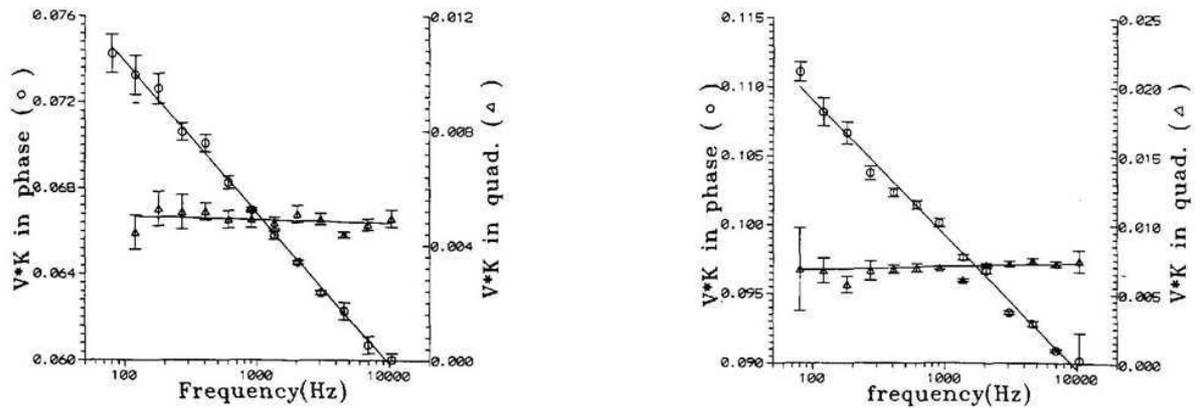


Figure 9 : Variation de Kph (triangle) et Kqu (cercle) en fonction de la fréquence (Dabas *et al.* 1992)

2.5 Origine du signal magnétique

L'expression « signal magnétique » est utilisée pour éviter d'avoir à détailler chacune des propriétés magnétiques d'un sol et pour exprimer l'idée que ces propriétés sont porteuses d'une information, souvent intéressante sur le plan archéologique, sur les conditions de formation et d'évolution de ce sol.

Le premier élément du signal magnétique est l'augmentation de la susceptibilité. Celle-ci est associée à deux facteurs majeurs (Le Borgne 1960b) : le climat chaud et humide qui s'exprime à travers les propriétés magnétiques de l'horizon B et la fréquence des feux naturels (Kletetschka *et al.* 1995). Des relations ont aussi pu être mises en évidence entre la pollution en métaux lourds et la susceptibilité magnétique (Hanesh *et Scholger* 2002).

2.5.1 Pédogenèse

La pédogenèse recouvre l'ensemble des processus, climatiques, physiques, chimiques et biologiques, qui, à partir de la roche mère le plus souvent altérée, aboutissent à l'apparition d'un sol. Les échelles de temps qu'elle fait intervenir sont très courtes par rapport au temps « géologique » (de l'ordre de la centaine ou du millier d'années). Dans la plupart des pays du monde la pédogenèse a été et est fortement influencée par l'activité des sociétés humaines. De fait, on peut dire que les sols sont un « objet culturel ».

2.5.1.1 L'altération de la roche mère

La roche mère peut être considérée comme la réserve et le porteur du potentiel magnétique. Son altération sous l'influence de facteurs climatiques comme biologiques permet la mobilisation du fer et la modification des minéraux et du complexe d'altération, sous des formes le plus souvent peu

magnétiques (comme la goethite), à travers plusieurs processus physiques (hydrolyse, oxydation, réduction, hydratation et dissolution) (Schwertmann 1995). Ces minéraux peuvent aussi servir de précurseurs à la formation de matériaux plus magnétiques, comme la magnétite (Banerjee, 1993).

L'altération de la roche sous l'action des seuls agents climatiques (formation d'un régoélite) tend à diminuer la susceptibilité magnétique car les minéraux peu magnétiques sont plus stables que les plus magnétiques, sauf pour les roches au départ très riches en magnétite où des grains de magnétite et d'ilménite peuvent résister à l'altération sous forme de gros grains multi-domaines (Liu *et al.* 1999). Plus la proportion de fer sera importante dans la roche mère plus l'horizon superficiel pourra être magnétique. Une altération très avancée peut entraîner une diminution de la susceptibilité magnétique par la transformation des minéraux en argile.

2.5.1.2 La formation du sol et ses relations avec le signal magnétique

La nature des oxydes et hydroxydes de fer et leur teneur dans le sol est un marqueur de la pédogenèse, ce qui implique deux relations interdépendantes : la nature et la concentration des minéraux permettent d'identifier les processus pédologiques et, à l'inverse, le type de pédogenèse répond pour une part non négligeable des variations de propriétés magnétiques des sols (Marmet 2000, Thiesson 2007). Ces variations de teneur en oxyde sont dues aux différentes phases de migration du fer, dépendantes de la température, du régime hydrique, du pH, du potentiel d'oxydoréduction et de l'activité biologique (Gobat 1998).

La porosité joue un rôle important dans le développement des sols et des phénomènes de formation du signal magnétique qui peuvent y être associées. L'argile, qui à une porosité élevée (vides contenus dans les matériaux) et une très faible porosité utile (pores de petite taille), influe directement sur le signal magnétique.

- Lorsque le milieu est saturé en eau (condition anaérobie), le fer est réduit et les oxydes de fer magnétiques sont dissous. La susceptibilité magnétique qui en résulte est faible (Le Borgne 1955, Dearing *et al.* 1996, Williams 1992).
- Lorsque l'aération du sol est faible et qu'elle redevient soudainement bonne, l'activité biologique augmente et le fer précipite sous forme d'oxydes ou d'hydroxydes de fer ferriques insolubles qui sont alors immobilisés (Duchaufour 1991) entraînant l'augmentation du signal magnétique (Freke and Tate 1961).

La forte acidité des milieux argileux est défavorable à l'activité biologique. Le stress hydrique dû aux alternances de sécheresse et d'engorgement en eau contrarie le développement du système racinaire. Le mauvais drainage entraîne alors la réduction des minéraux, ce qui provoque la diminution de la susceptibilité de ces sols (gley ou pseudo-gley).

Les podzols associés à des substrats sableux présentent des valeurs de susceptibilité magnétique moyennes, dépendantes du degré plus ou moins avancé du lessivage du sol. Les niveaux d'accumulation argileuse Bt peuvent présenter de fortes valeurs de susceptibilité magnétique. De façon générale sur ces sols, la susceptibilité augmente avec la profondeur, phénomène dû au lessivage et à la migration du fer dans les horizons les plus profonds. L'horizon éluvial E, comme le substrat sableux, présente de faibles valeurs de susceptibilité.

Les sols bruns calcaires à bruns calciques se développent sur des substrats calcaires. Les valeurs de susceptibilité peuvent, à l'inverse de celles de la roche mère, être assez élevées, avec une forte teneur potentielle en lépidocrocite dans l'horizon B (Marmet 2000).

Sur les substrats cristallins, la composition minéralogique du granite crée une très forte variabilité de la susceptibilité, corrélée avec la présence de biotite et occasionnellement de magnétite. Les sols bruns acides qui se développent sur ce type de substrat, notamment dans les conditions climatiques de moyenne montagne, sont associés à des profils de susceptibilité qui diminuent avec la profondeur (Marmet 2000).

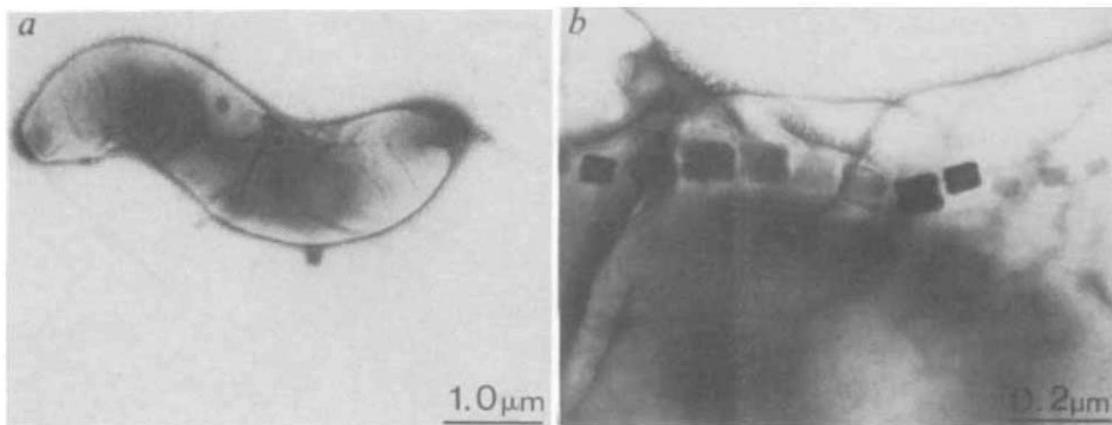


Figure 10 : Images de uranyl-acetate-stained magnetic bacteria de l'horizon Ah d'un moor (Fassbinder 1990)

Les sols bruns lessivés se développent sur des matériaux limoneux ou lœssique, favorables à l'activité biologique. Les processus pédologiques associés à ces dépôts entraînent la formation d'un signal magnétique. L'horizon B, et l'horizon C, peuvent présenter de fortes valeurs de susceptibilité. (Marmet 2000)

Indépendamment du type de sols, il existe des différences de comportement magnétique entre les horizons :

- L'horizon A présente une forte concentration de magnétite monodomaine produit par la synthèse intracellulaire des *magnetotactica bacteria* (fig. 10). La chauffe et la précipitation chimique des matériaux favorisent dans les milieux aérés la formation de la magnétite superparamagnétique (Taylor et Schwertmann 1974, Maher et Taylor 1988). Ces processus en

font un horizon particulièrement magnétique, qui met en évidence l'étroite relation entre magnétite et susceptibilité magnétique.

- L'horizon lessivé, E, est un indice de la maturité d'un sol. Si celui-ci présente un lessivage très important, il peut perdre tout ou partie du signal magnétique.
- L'horizon illuvial B correspond à un niveau d'accumulation d'argile et d'oxyde de fer. Il est associé à la présence de goéthite et de lépidocrocite. Son comportement magnétique peut être très variable. Ses fortes valeurs de susceptibilité sont le produit de l'accumulation des éléments fins magnétiques des horizons superficiels. L'augmentation de la densité entraîne alors celle de la susceptibilité volumique.

Lorsque la profondeur augmente, la susceptibilité diminue, les grains de magnétite et de maghémite devenant ultrafins (Marmet *et al.* 1999, Fine *et al.* 1989). Le manque d'oxygène en profondeur crée un milieu réducteur qui favorise plutôt la formation de la greigite, ce qui augmente aussi, mais de moindre façon, la susceptibilité magnétique.

2.5.2 La chauffe des matériaux

La chauffe des matériaux est la première cause identifiée de l'augmentation de la susceptibilité magnétique (Mullins 1977, Le Borgne 1955, Dearing *et al.* 1996, Rumery *et al.* 1979). Elle se fait par réduction de l'hématite en magnétite, puis de son oxydation en maghémite, ou, par déshydratation de la lépidocrocite en maghémite. Ces transformations sont souvent associées à la présence de l'homme. Les conditions de chauffe peuvent entraîner des différences notables dans la formation des grains magnétiques et des propriétés magnétiques associées.

2.5.2.1 Facteurs physiques de la chauffe

La chauffe est régie par de nombreux paramètres : la température, la durée, les répétitions, les conditions redox du milieu lors de la chauffe et du refroidissement. Ces différents paramètres influent directement sur le signal magnétique mais aussi sur l'aspect des structures et la rubéfaction des sédiments (Marmet 2000).

La propagation de la chaleur se fait par conduction. Celle-ci est dépendante des propriétés thermiques du matériau : compacité, texture, nature minéralogique, humidité des sédiments. Les sols sableux sont, par exemple, plus conducteurs que les sols argileux (Tabbagh 1976). De manière générale, le sol qui présente une bonne résistance thermique et une faible diffusivité empêche les modifications des propriétés magnétiques en profondeur.

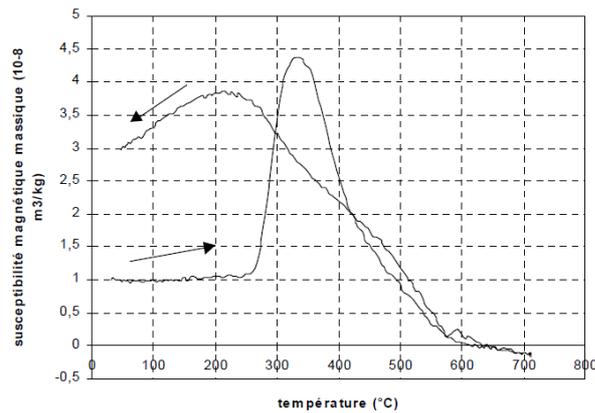


Figure 11 : Courbe thermomagnétique montrant vers 260°C une forte augmentation de la susceptibilité liée à la transformation de la lépidocrocite en magnétite (Marmet 2000)

La température et la durée de la chauffe sont déterminantes pour l'augmentation de la susceptibilité magnétique en profondeur. Ces phénomènes peuvent être amplifiés par la répétition des chauffes (cas des foyers domestiques). Il s'en suit que les fours de potiers ou de tuiliers peuvent modifier les propriétés minéralogiques du sol sur une profondeur qui peut dépasser les 30 cm (Marmet 2000).

Par contre, la chauffe associée aux techniques de mise en valeur agricole et les foyers à usage unique ont un effet limité sur l'augmentation de la susceptibilité magnétique en profondeur et il faudra un brassage du sol pour qu'une augmentation se manifeste en profondeur.

La température est donc la plus évidente cause des variations de susceptibilité magnétique bien que les modifications minéralogiques qu'elle génère et les conséquences sur le signal magnétique soient complexes (fig. 11). C'est entre 400 et 500°C qu'ont lieu les principales transformations. Elles sont étroitement reliées aux conditions redox : celle de l'hématite en magnétite se fait en milieu réducteur alors que celle de la magnétite en maghémite et hématite se fait en milieu oxydant. Ces variations sont associées à la consommation d'oxygène et la production d'oxydes de carbone suite à la combustion et au dégazage de la matière organique du combustible présent dans le sédiment (Marmet 2000).

2.5.2.2 Influence de la nature du matériel sédimentaire

La nature du matériel sédimentaire joue un rôle essentiel dans la formation des grains magnétiques. Les proportions relatives d'oxydes et d'hydroxydes de fer qui sont nécessaires à la formation des oxydes magnétiques dépendent d'abord des minéraux présents dans l'horizon superficiel (hématite, goéthite et lépidocrocite) et déterminent la valeur finale de la susceptibilité. Leur transformation totale en oxydes magnétiques, qui est rarement atteinte, se fait à 500° en condition

réductrice. Le refroidissement qui a souvent lieu en milieu oxydant entraîne une perte de la susceptibilité.

La quantité de matière organique dans le matériel sédimentaire a également un effet déterminant sur le signal magnétique car c'est la principale cause des conditions réductrices. Elle amplifie les effets de la combustion du foyer.

Pour conclure, la température est le paramètre essentiel pour débiter une réaction : à 260 ° la lépidocrocite se déshydrate pour former la maghémite, à 400° l'hématite/goethite est réduite en magnétite, à 300° la magnétite s'oxyde en maghémite puis la maghémite se réduit en magnétite. Les conditions redox permettent ou non la réduction de l'hématite et l'oxydation des oxydes de fer magnétiques. Au-delà de 400°C, la susceptibilité augmente en condition réductrice, et diminue en condition oxydante.

2.6 Evolution du signal magnétique des sols

Il est souvent difficile de dissocier les effets anthropiques des effets naturels. Néanmoins il est clair que l'établissement de l'homme a un fort impact sur les propriétés magnétiques d'un site (Marmet 2000).

2.6.1 Facteurs naturels

2.6.1.1 Influence du climat

Le climat joue un rôle significatif dans la formation du signal magnétique puisque les alternances climatiques entraînent des alternances de conditions oxydantes et réductrices; favorisant la formation de la maghémite puis de la magnétite. Par l'intermédiaire de processus topographiques et éoliens, le climat a une incidence directe sur l'apparition, le maintien ou la disparition de la fraction fine du sol qui contient les minéraux magnétique. Par l'intermédiaire de l'activité biologique, le climat a une incidence sur la production de magnétite (et de greigite) biogéniques. Les travaux sur les loess chinois ont permis de mettre en évidence la différence notable entre le signal magnétique des dépôts de période froide et celui des paléosols, ce qui en fait un bon indicateur de l'existence d'une pédogénèse (fig. 12).

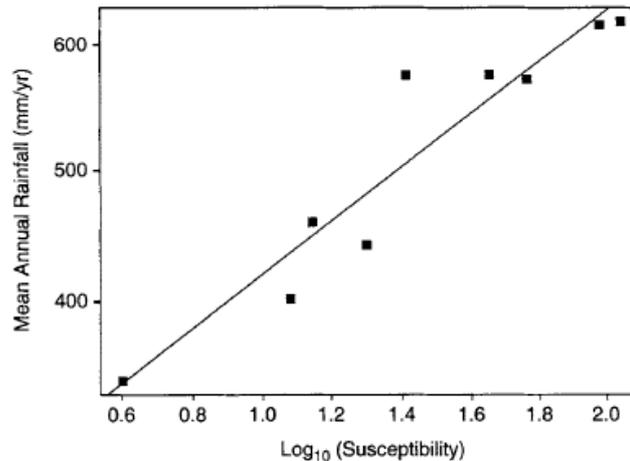


Figure 12 : Relation entre précipitation annuelle et susceptibilité magnétique sur des sols modernes sur 9 sites sur le plateau lœssique chinois (précipitation en mm/an et susceptibilité en $10^{-8} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ (Maher et Thompson 1995)

2.6.1.2 La topographie

Dans les régions où le relief est marqué, la topographie détermine partiellement la susceptibilité magnétique : l'eau assure un transport en suspension de particules solides qui s'ajoute au transport en solution – lessivage latéral ou oblique – et toute modification du régime hydrique local entraîne des variations du potentiel d'oxydo-réduction et donc du signal magnétique. Ces deux effets peuvent se conjuguer ou se contrarier.

Sur les plateaux où les variations de faciès horizontales sont peu marquées, le sol, est souvent de faible épaisseur, la pédogenèse est marquée par des phénomènes de percolation verticale qui favorisent un fort signal magnétique.

Les versants provoquent un déplacement unidirectionnel de sédiments vers l'aval par processus gravitaire. Sur les versants longs, la susceptibilité est plus forte en hauteur et sur les zones de stabilités, elle est très faible dans les zones d'inflexion et intermédiaire en bas de versants. Cependant, l'érosion des horizons superficiels des sols - les plus magnétiques - peut entraîner des modifications du signal magnétique à l'échelle d'un versant.

La dynamique fluviale, dans les plaines alluviales, est régie par la taille du bassin versant, la pente du cours d'eau et le régime hydroclimatique. Les niveaux de grave sont la conséquence d'une source proche ou d'un fort dynamisme, les niveaux sableux des régimes intermédiaires, et les dépôts limono-argileux des dépôts d'inondation. Ces milieux, en raison de la présence ou non de particules fines, peuvent présenter une susceptibilité magnétique variable. Le drainage naturel dans les matériaux moins argileux et sableux, à l'inverse des milieux très argileux, limite la dissolution des oxydes de fer et favorise la conservation d'un signal magnétique.

2.6.1.3 Végétation

Sous les climats tempérés, l'activité biologique est le processus prédominant dans l'altération et la formation des sols. C'est, hors intervention humaine, la cause principale de l'augmentation de la susceptibilité magnétique.

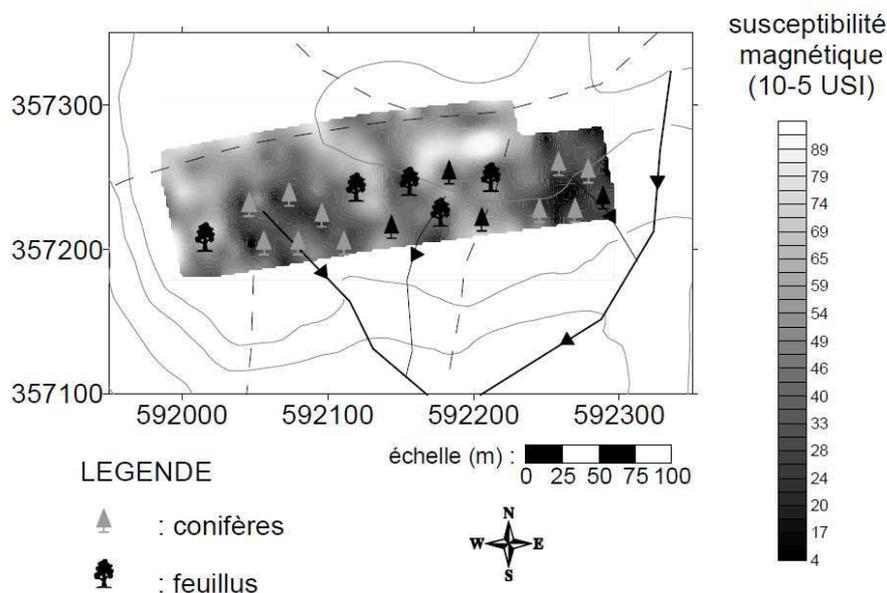


Figure 13 : Relation entre susceptibilité magnétique et végétation (prés, bois de conifères et bois mixtes) (Marmet 2000)

La végétation, qui modifie le microclimat à la surface du sol et les processus d'entraînement, favorise l'activité microbienne de l'humus. Son influence est dépendante de la litière qui contrôle l'activité bactérienne.

La végétation améliorante – frênes, érables, saules, tilleuls, aulnes, etc. – se développe sur les sols riches en azote et en cellulose et pauvres en lignine, et entraîne un signal magnétique fort. La végétation acidifiante – épicéas, pins, etc. – occupe des sols pauvres en azote et riche en lignine qui inhibent l'activité bactérienne. Ces conditions génèrent un signal magnétique faible. La végétation neutre, type chênes et hêtres n'agit pratiquement pas sur la genèse du sol et donc sur le signal magnétique (fig. 13).

La végétation la plus courante sur les surfaces où se déroulent les opérations d'archéologie préventive est le résultat d'un processus de dégradation des forêts et du maintien d'un couvert végétal artificiel par l'homme.

Dans les prés, les sols sont l'objet d'un lessivage lent où se met en place un signal magnétique fort par la présence de végétation améliorante. L'importante activité biologique augmente la formation de la magnétite et la complexation des argiles, du fer et de la matière organique permet une bonne aération du sol. Néanmoins certains de ces terrains sont souvent saturés en eau, ce qui diminue la susceptibilité magnétique par mise en solution des ions ferreux.

2.6.2 Facteurs anthropiques

La répétition des feux marque l'anthropisation des sols, et de fait, modifie le signal magnétique. Cette modification se concentre dans les niveaux superficiels en raison de la mauvaise diffusion de la chaleur en profondeur. L'impact d'un incendie sur le signal magnétique n'atteint ainsi que les deux premiers centimètres, voir plus si la teneur en matière organique est significative (Benech 2002).

2.6.2.1 La mise en valeur des terres

La mise en valeur des terres est le produit de l'exploitation par l'homme du milieu naturel. Le paysage souvent associée à l'exploitation agricole, forestière, minière ou hydraulique, en est le témoin. Le signal magnétique dépendant de ces activités est un indice de l'anthropisation du paysage (Marmet 2000).

2.6.2.2 Le labour

Du brassage de l'horizon superficiel, Ap, résulte une homogénéisation verticale et une diffusion horizontale du signal magnétique. L'aération du sol favorise l'activité biologique et donc l'augmentation du signal magnétique associé à la formation de la maghémite. En revanche, un passage répété d'engins agricoles au même endroit peut tasser les sols et former une semelle de labour ce qui rend plus difficile la circulation des fluides et constitue une barrière infranchissable par les racines. Le travail agricole peut également donner lieu à une érosion partielle ou totale de l'horizon A (Marmet 2000). Ces deux effets ont un impact direct sur le signal magnétique.

2.6.2.3 Drainage et billons

Un fossé peut être associé à un système de drainage, d'irrigation ou constituer une limite parcellaire. Améliorant l'aération du sol et accélérant la pédogénèse, il agit sur l'augmentation du signal magnétique.

Les champs en billons, encore fossilisés dans certaines zone de pâtures, sont des levées de terres parallèles, causées par le déversement sur un même côté de la terre par une charrue à versoir fixe. Cette technique augmente la superficie de terres arables exploitable, matérialise le parcellaire, et améliore la qualité du sol. Elle participe ainsi à la formation du signal magnétique.

2.6.2.4 Ecobuage, essartage et culture sur brûlis

La culture sur brûlis consiste à alterner défrichements par le feu et culture sur terrains enrichis en cendres. L'essartage - déboisement de forêts en taillis, combustion de l'herbe et du petit bois et utilisation des cendres – permet de fertiliser les parcelles déboisées avant leur mise en culture. Ces techniques entraînent la formation directe d'un signal magnétique résultant de la chauffe (fig. 14).

L'écobuage par la combustion de la couche superficielle d'un terrain en friche ou d'un champ et par la répartition des cendres, impacte dans une moindre mesure le signal magnétique.

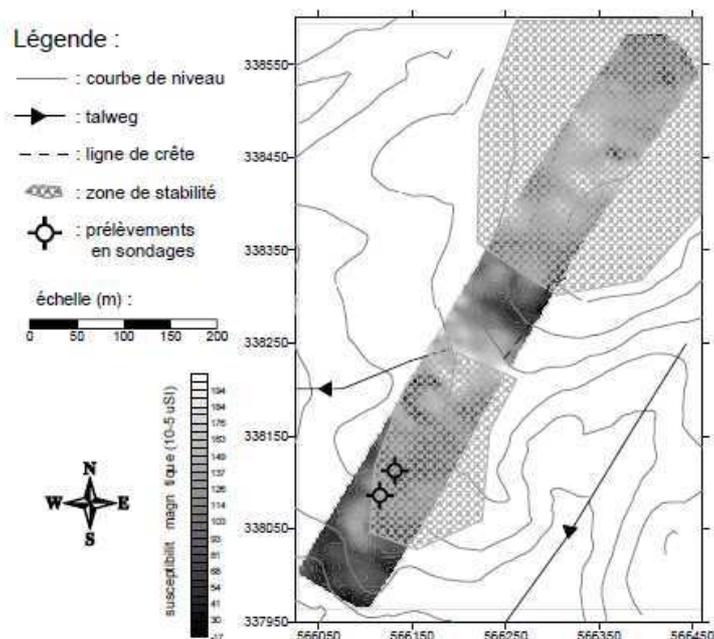


Figure 14 : Mesure de susceptibilité magnétique à large maille sur la zone 53 de l'A89 montrant de fortes valeurs liées à la chauffe du sol (Marmet 2000)

L'amendement des terres augmente le contraste du signal magnétique entre les horizons labourés et l'encaissant par l'apport de fumure et d'amendement (épandage de cendre, de scories, d'engrais, fumier, craie, chaux, etc.). En fonction de la nature des matériaux rapportés, on peut observer de fortes variabilités au sein de l'horizon Ap : le chaulage diminue la susceptibilité magnétique alors que les scories provoquent un fort signal magnétique. La chaux et les tessons sont susceptibles, en modifiant l'acidité du sol, de favoriser l'activité bactérienne et donc la formation de magnétite.

2.6.2.5 Modification du signal magnétique sur les sites archéologiques

La magnétite est un marqueur de l'anthropisation des sols (fig. 15). Sa synthèse est favorisée par les perturbations du sol causées par l'homme, bien qu'elle puisse être le résultat de processus naturels (Tite et Mullins 1971).

Les sites métallurgiques présentent un signal magnétique important et contrasté avec le signal naturel (Dabas 1989). Ils sont aisément reconnaissables par la dépendance fréquentielle de la susceptibilité magnétique observable sur les échantillons de sol. Le rapport entre partie en phase et partie complexe de la susceptibilité magnétique y est anormalement faible : de l'ordre de 2% - cas des grains de gros volume - alors que ce rapport est normalement de l'ordre de 7 à 10 % pour des sédiments non métallurgique - cas des grains monodomaines de petite taille - (Dabas 1989). La décroissance du signal magnétique visqueux y est plus rapide que celle en logarithme du temps qui caractérise les grains monodomaines dispersés de petite taille, représentatifs des sols naturels. Malgré ces caractéristiques, les sites de métallurgie sont rarement rencontrés et ne sont l'objet que de découvertes ponctuelles, sans commune mesure avec les découvertes de sites où l'aimantation des structures en creux est d'origine naturelle ou entraîné par la chauffe.

Pour certains auteurs, la fermentation associée à l'activité humaine serait un phénomène aussi important que les feux de forêts (Maher et Taylor 1988). Les sédiments archéologiques contiennent des grains de magnétite et de greigite d'origine abiotique ou biotique, dont la taille se situe à la frontière superparamagnétique et monodomaine, (Fassbinder *et al.* 1990, Moskowitz *et al.* 1993). Il arrive également que la susceptibilité des sédiments archéologiques soit plus importante que l'horizon Bt des loëss, ce qui serait lié à la présence de maghémite ultrafine produite par la déshydratation de la lépidocrocite à des températures pouvant être atteintes par des structures domestiques.

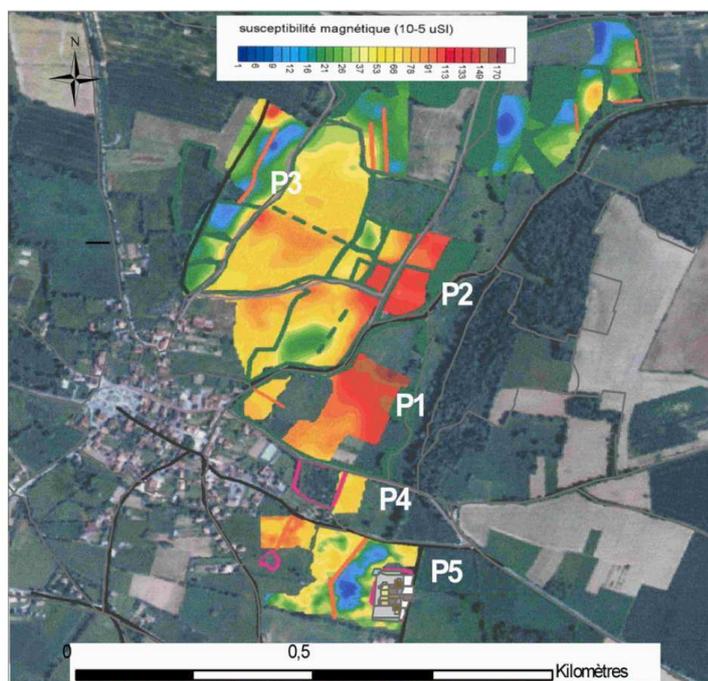


Figure 15 : Carte de susceptibilité magnétique sur le site de Chassenon qui révèle les zones d'occupations archéologiques P1 à P5 (Marmet 2002)

Les terres noires ont un signal magnétique plus important que les horizons naturels. On trouve dans la littérature des valeurs de 39.10^{-8} à $302.10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$, sur les sols bruns de terre noire (MacPhail 2004).

3 Les outils de prospections

Le but de ce travail n'étant pas le développement d'un instrument ou d'une méthodologie propre à sa mise en œuvre, les différents outils et méthodes ne seront présentés que succinctement.

3.1 La prospection électrique

3.1.1 Principe de mesure

Pour cartographier la résistivité électrique on injecte un courant dans le sol à l'aide de deux électrodes d'injection et on obtient la différence de potentiel aux bornes de deux électrodes de mesures. La densité de courant dans les sols étant donnée par J et le champ électrique par E on obtient la valeur de ρ , fonction de la différence de potentiel, du courant injecté et du coefficient géométrique. ρ est dépendant de la configuration d'implantation des quatre électrodes (Telford 1976).

3.1.2 Configuration d'implantation des électrodes

La mesure est représentative d'une distribution hétérogène de la résistivité du sous-sol.

Pour trouver la valeur de résistivité apparente du sous-sol on applique un facteur correctif dit géométrique à la mesure de potentiel. Ce facteur géométrique prend en compte la géométrie du dispositif d'implantation des électrodes (la distance les séparant).

	Wenner	Wenner-Schlumberger	Dipole-dipole	Pole-pole	Pole-dipole
Sensitivity of the array horizontal structures	++++	++	+	++	++
Sensitivity of the array vertical structures	+	++	++++	++	+
Depth of investigation	+	++	+++	++++	+++
Horizontal data coverage	+	++	+++	++++	+++
Signal Strength	++++	+++	+	++++	++

The labels are classified from (+) to (++++), equivalent at poor sensitivity to high sensitivity for the different array configurations.

Figure 16 : Caractéristique des différentes configurations d'implantation d'électrode (Samouëlian *et al.* 2005)

On utilise couramment différentes configurations qui présentent ou non des avantages en fonction des objectifs et du contexte de mesure (fig. 16). Nous avons ici utilisé 4 configurations : Wenner α , Wenner β , Dipôle-dipôle et Pôle-pôle (fig. 17).

La configuration Wenner α est assez sensible aux variations verticales de résistivité et moins que les autres aux variations horizontales. Elle a une profondeur d'investigation moyenne par rapport aux autres configurations et un rapport signal/bruit fort. Cette configuration est de fait adaptée aux environnements bruités.

La configuration Wenner β peut être considérée comme un cas particulier de la configuration dipôle-dipôle. Elle est particulièrement sensible aux variations horizontales de résistivité. Elle est intéressante pour caractériser des structures verticales mais non pour la détection des structures horizontales comme les niveaux sédimentaires. Sa profondeur d'investigation, plus importante, reste néanmoins limitée. La configuration dipôle-dipôle a été utilisée pour le panneau électrique et la configuration Wenner α pour les sondages électriques.

La configuration Pôle-Pôle a une assez grande couverture horizontale, une importante profondeur d'investigation mais sa résolution est assez mauvaise. La distance entre les deux électrodes lointaines doit être d'au moins 20 fois la distance entre les électrodes les plus proches, pour que l'erreur d'approximation soit inférieure à 5%. Elle est de fait utilisée pour les mesures avec de faibles écartements entre les électrodes, de l'ordre de quelques mètres maximum, condition adaptée aux problématiques archéologiques. Cette configuration est plus sensible aux variations existantes entre les électrodes de courant.

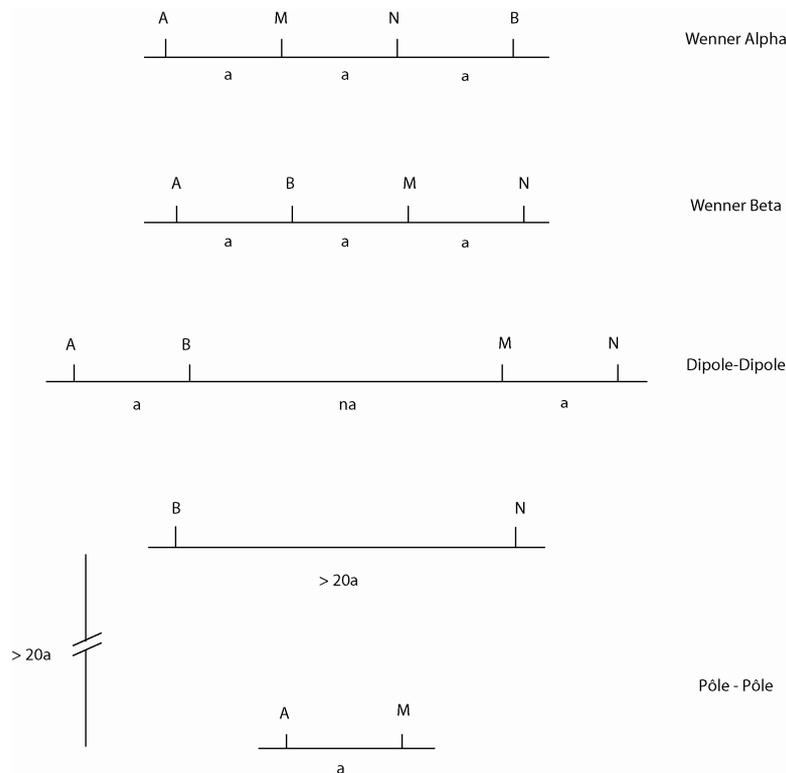


Figure 17 : Configurations d'électrodes utilisées dans le cadre des prospections

3.1.3 Problème inverse

La mesure de la résistivité électrique apparente rend compte d'un volume de sol où la circulation du courant est significative : plus l'écartement entre les électrodes est important, plus le volume de sol augmente. On obtient alors une valeur de résistivité apparente représentative d'un volume défini par l'écartement entre les électrodes.

Or la résistivité apparente que nous mesurons n'est pas directement celle des objets archéologiques ou géologiques que l'on cherche à analyser, c'est pourquoi quand cela est possible, il est préférable de réaliser une inversion des données.

L'inversion permet de retrouver un modèle à partir des mesures effectuées. Alors qu'un modèle donne un seul résultat, un même résultat peut-être du à une infinité de modèle. Il en résulte que le modèle obtenu s'il restitue fidèlement les mesures doit aussi être en cohérence avec l'ensemble des informations que l'on peut par ailleurs rassembler sur le sol considéré.

De façon générale, les techniques d'inversion pour les propriétés électriques sont bien maîtrisées. Il existe cependant de nombreuses alternatives pour chaque type de mesure ou de contexte où les sensibilités des différentes configurations rentrent en compte dans la qualité de chaque modèle, fonction du contexte.

Plus l'inversion s'approche d'un modèle simple, comme c'est le cas par exemple pour l'inversion 1D, plus il schématise la réalité. Plus le modèle est proche de la réalité, par exemple par une inversion 3D, plus le calcul va être long à effectuer, car le nombre de paramètres peut devenir très important. Réciproquement pour rendre compte de la façon la plus précise possible d'un modèle complexe, il faut un grand nombre de mesures. Le prospecteur doit donc rechercher des solutions permettant de proposer rapidement des modèles les plus réalistes possibles (Guerin *et al.* 1996, Meheni *et al.* 1996). Pour cela, on peut associer une approche simpliste 1D, afin de définir l'environnement électrique d'une structure complexe 3D puis réaliser l'inversion 3D qui définisse le plus précisément possible les caractéristiques géométriques et électriques de la structure. Le temps d'acquisition étant aussi un paramètre très important, les inversions doivent se faire à partir d'un nombre de mesure qui restera limité, ce qui implique des modèles relativement simples.

3.1.4 Les mesures

3.1.4.1 Le sondage électrique 1D

Le sondage électrique 1D consiste à écarter progressivement les électrodes de mesure afin de prendre en compte un volume de sol de plus en plus important. On cherche ensuite à retrouver à partir

de ces mesures les valeurs de résistivités interprétées de chaque couche stratigraphique en réalisant une inversion 1D.

Pour le sondage « vertical », on part de l'hypothèse que le terrain est tabulaire et que chaque interface est une surface plane horizontale, ce qui rarement le cas dans la réalité où les niveaux archéologiques et les couches géologiques peuvent présenter un pendage qui n'est pas pris en compte dans l'inversion des données. Le choix de la localisation d'un sondage n'est donc pas anodin, mais doit se faire à partir d'une cartographie de la résistivité apparente en un emplacement où les variations latérales sont faibles. Pour réaliser ces sondages il faut donc éviter au maximum les zones de vestiges qui entraînent des distorsions sur les mesures, non modélisables. Ainsi pour les paléochenaux qui ne peuvent pas, à l'échelle du dispositif, être considérés comme tabulaires on disposera les électrodes selon une ligne parallèle à l'axe du chenal.

Une autre difficulté que l'on rencontre dans les interprétations 1D tient aux phénomènes d'équivalence: une couche de transition qui se placerait entre une couche plus résistante et une autre moins résistante peut être supprimée (ou réciproquement ajoutée) sans que la précision de l'inversion ne s'en ressente. Une couche conductrice placée entre 2 couches plus résistantes peut être remplacée par une autre couche conductrice de même rapport épaisseur sur résistivité, et une couche résistante placée entre deux couches conductrices peut être remplacée par toute autre couche résistante ayant le même produit épaisseur par résistivité. Ces phénomènes sont particulièrement complexes dans le cas des niveaux archéologiques : les couches limoneuses anthropiques dans des zones de débordements limoneux ne peuvent y être observées. Le sondage peut aussi permettre de définir le contexte électrique du substrat et des niveaux dans lesquels sont creusées les structures, pour l'inversion des données électriques. Dans de nombreux cas, il est très efficace pour renseigner la profondeur du toit du substrat ou de la nappe phréatique.

Les mesures de sondages sont effectuées avec le RMCA4, un résistivimètre développé par le laboratoire Sisyphe. L'écartement entre les électrodes s'échelonne de façon logarithmique de 0,2 jusqu'à seulement 10 m, car dans le cadre de cette étude seuls les niveaux les plus superficiels nous intéressent.

3.1.4.2 La tomographie électrique

Pour réaliser une pseudo-section de résistivité électrique, on dispose le long d'un axe une série d'électrodes que l'on interroge en respectant un type de configuration avec des écartements et des centres de mesures variables. On obtient alors les valeurs de résistivité apparente à plusieurs profondeurs et sur plusieurs centres de mesure en surface. On utilise à la fois les configurations Wenner et Dipôle-dipôle afin d'observer des différences de sensibilité qui pourraient être dues à des hétérogénéités 3D dans l'environnement immédiat des électrodes.

Les pseudo-sections électriques, ont été réalisées avec le Syscal Pro de Iris Instrument, avec 96 électrodes espacées de 50 cm afin de conserver une bonne résolution en surface (fig. 18).



Figure 18 : Mise en œuvre du panneau électrique sur le site de Sainte-Croix-en-Plaine

3.1.4.3 La cartographie électrique

Pour la mesure de traîné électrique, on déplace un dispositif porte-électrode sur lequel sont fixées 4 électrodes tous les 50 cm. Le résistivimètre est un RM15-D couplé à un démultiplexeur MPX15 développé par Geoscan Research (fig. 19). On interroge ensuite à la manière du panneau électrique chaque électrode, pour obtenir trois mesures avec 50 cm d'écartement entre les électrodes, deux avec 1 m d'écartement entre les électrodes et une avec un écartement de 1,5 m. Ce maillage de points est trop léger pour réaliser une inversion des données comme pour le sondage électrique ou le panneau électrique. On peut cependant en interpolant entre les centres de mesures obtenir un maillage homogène pour trois écartements de mesures donc pour trois profondeurs d'investigation différentes. En se basant ensuite sur un modèle simple estimé à partir d'un sondage électrique on peut alors réaliser une inversion 1D du terrain sur deux des paramètres des niveaux superficiels. Sur les terrains présentant de très fortes résistivités sous une couche superficielle conductrice, cela n'est pas envisageable car la résistivité du terrain entraîne une mauvaise circulation des courants dans le sol, tous concentrés en surface. Dans ce cas, les mesure à trois écartements (0,5, 1 et 1,5 m) sont à une profondeur quasi-identique, l'inversion présente alors peu d'intérêts. Cette inversion permet de retrouver les caractéristiques électriques et géométriques des couches superficielles. La connaissance de ces paramètres laisse alors la possibilité de réaliser une inversion 3D pour reconnaître la géométrie et les caractéristiques électriques d'un objet simple archéologique (murs, fossés, etc.) (Brinon *et al.* à paraître).

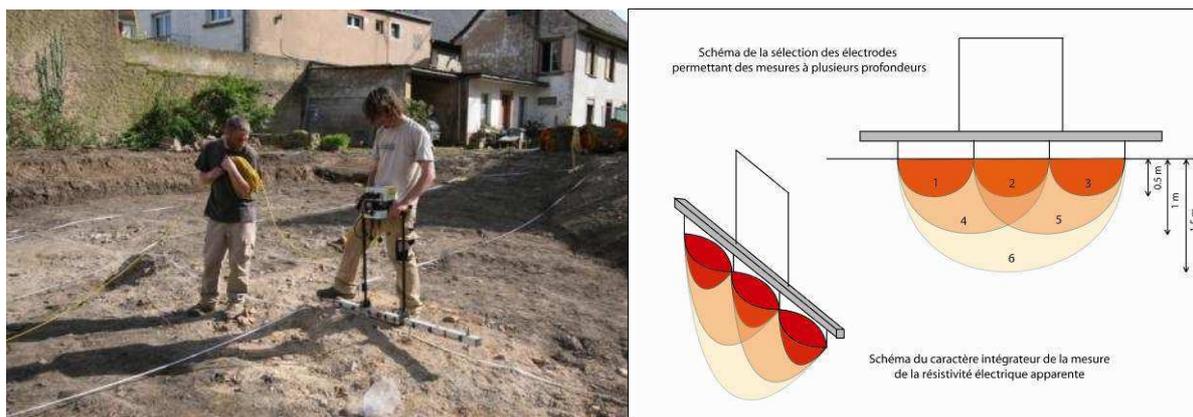


Figure 19 : Dispositif électrique, RM15 (Geoscan Research) et schéma de mesures

3.2 La prospection magnétique

La méthode magnétique rend compte des contrastes latéraux de propriété magnétique sans pouvoir discriminer les différents types d'aimantation. Elle possède une profondeur d'investigation qui n'est dépendante que de la taille de la surface couverte, du contraste d'aimantation et du volume de l'objet recherché (Telford 1976).

3.2.1 Origine et comportement du champ magnétique terrestre

La prospection magnétique se base sur la mesure du champ magnétique terrestre qui a pour origine des mouvements de convection dans le noyau. Ce champ est déformé par les champs créés par les mouvements de charges dans l'ionosphère et la magnétosphère. On s'accorde à considérer en première approximation que l'ensemble du champ magnétique se comporte comme un champ dipolaire créé par un aimant orienté selon un axe nord-sud. Le champ magnétique terrestre n'est uniforme ni dans l'espace ni dans le temps mais à l'échelle d'une prospection archéologique plusieurs solutions peuvent aisément être mises en œuvre pour éliminer les variations dans le temps (Tabbagh 2003), les variations dans l'espace étant celles recherchées par le prospecteur (fig. 20).

3.2.2 Formation et comportement des anomalies magnétiques

L'aimantation totale associée à la présence d'un objet ou d'une structure archéologique peut être ou non parallèle au champ magnétique terrestre local. Si l'anomalie résultante montre une aimantation parallèle au champ magnétique terrestre, l'aimantation peut être induite ou rémanente. S'il s'agit d'une aimantation thermorémanente, l'orientation de l'aimantation des grains acquise lors du refroidissement est la même que celle du champ actuel. Au cours des temps archéologique, on peut considérer l'orientation du champ comme à peu près constante. Si l'anomalie n'est pas orientée sur le

champ magnétique terrestre, alors son aimantation ne peut être que rémanente. En général, les anomalies « non orientées » correspondent à des objets très magnétiques en fer (ou acier) le plus souvent.

Il n'est pas possible de déterminer de façon unique la taille, la profondeur et l'aimantation d'un objet archéologique par la méthode magnétique. On peut néanmoins estimer quelques uns de ces paramètres en fonction de la forme de l'anomalie et de présupposés sur l'objet recherché (Desvignes *et al.* 1999). On peut, par exemple, estimer la profondeur de l'objet recherché en appliquant au résultat une déconvolution d'Euler : le problème majeur étant l'identification de l'indice structural N - établi par comparaison avec d'autres structures - la géométrie exacte de la structure n'étant pas connue. L'intensité de l'anomalie dépend aussi du contraste qui existe entre la structure et l'encaissant.

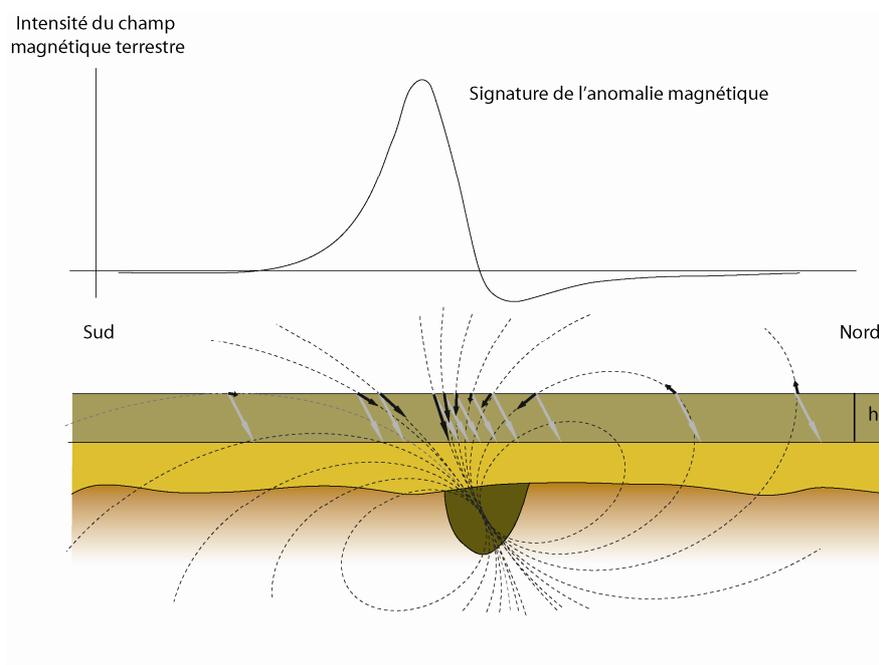


Figure 20 : Schématisation de la signature d'une anomalie produite par une structure magnétique (d'après Hesse 1978 et Hulin 2007)

Sous nos latitudes, l'anomalie dipolaire formée n'est pas centrée sur l'objet. On ne peut donc pas déterminer avec précision la position de l'objet par une seule lecture des données magnétiques : il faut pour cela projeter le comportement du champ en réalisant une réduction au pôle. A l'échelle d'une structure le décalage reste néanmoins limité entre la position de l'anomalie et l'objet archéologique, en raison de la taille restreinte et de la faible profondeur de l'objet cartographié dans les applications en archéologie.

Il est très courant de repérer des éléments en fer (pollution moderne) en surface qui créent un bruit de sol très important sur les données, parfois au point de dissimuler l'ensemble des autres anomalies. Le bruit dû à des éléments géologiques magnétiques peut être aussi important. On peut

minimiser l'impact de ce bruit par un filtrage des points aberrants, mais ce traitement n'améliore pas la reconnaissance des structures dissimulées par le bruit.

3.2.3 Les appareils mis en œuvre

Le développement des sondes magnétiques date de la deuxième guerre mondiale. Le premier instrument efficace pour la détection de cibles de faible contraste est la sonde fluxgate. Les premiers magnétomètres utilisés pour l'archéologie à la fin des années 50 sont les magnétomètres à protons. Dans les années 90, les magnétomètres à vapeur de Césium ont permis de gagner en souplesse et en rapidité de mesure. Aujourd'hui, les sondes fluxgate et les sondes à vapeur de Césium sont les plus couramment utilisées (fig. 21).

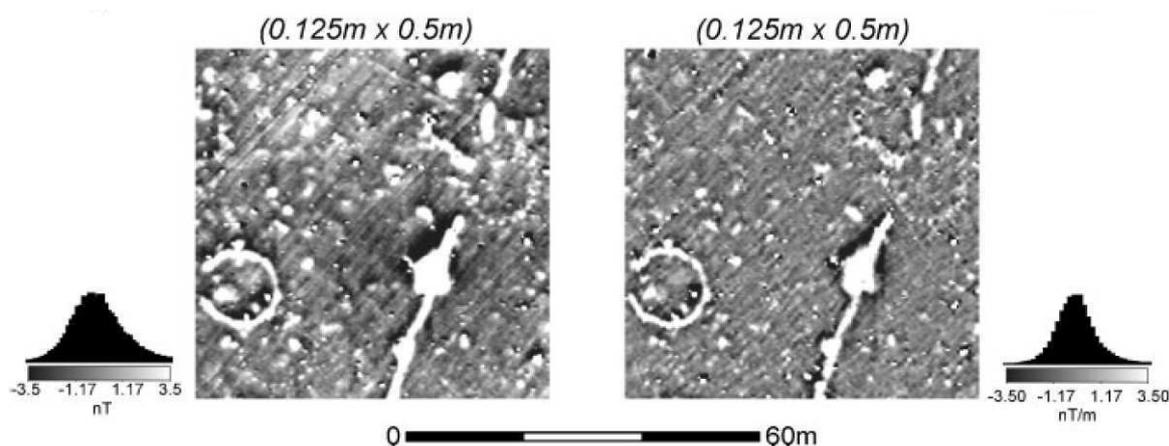


Figure 21 : Comparaison entre les mesures avec un magnétomètre à vapeur de Césium en champ total (à gauche) et un gradiomètre fluxgate (Bartington) (Linford *et al.* 2007)

3.2.3.1 Le magnétomètre ou gradiomètre de type fluxgate

Le système fluxgate est composé d'une spire entourant deux autres spires enroulées autour de barreaux métalliques en mu-métal. S'il n'y a pas de champ magnétique externe les deux champs créés par la circulation d'un courant dans les deux spires s'annulent. En présence d'un champ externe le système est perturbé, on enregistre alors un courant dans la spire entourant l'ensemble du système. Ce type de capteurs ne permet que la mesure d'une composante du champ magnétique. En prospection archéologique on place 2 capteurs de ce types de même orientation aux extrémités d'une canne de façon à d'une part éliminer par soustraction les variations temporelles du champ magnétique et d'autre part à garder strictement la même orientation pour les deux sondes ce qui permet de mesurer le pseudo-gradient dans la direction choisie pour les 2 sondes (en générale la verticale) Il n'est donc valable que pour des objets qui produisent une anomalie présentant une différence significative pour un écartement correspondant à celui du système (0.65 m pour le système Ferex de Foerster). Ces

limites entraînent des difficultés de mesure pour les structures profondes (Aspinall 2008). Les capteurs utilisés en archéologie mesurent la composante verticale du pseudo-gradient du champ magnétique soit un signal différentiel beaucoup plus faible que celui qui aurait été enregistré pour le champ total.

3.2.3.2 Les magnétomètres à pompage optique

Le fonctionnement du magnétomètre à vapeur de Césium met en jeu les propriétés des éléments du groupe alcalin dont le Césium fait partie. Avec cet atome le dédoublement (par effet Zeeman) des niveaux d'énergie induit par la présence d'un champ magnétique peut être mesuré par absorption d'une émission d'un signal électromagnétique à la fréquence correspondant à la transition entre les e niveaux. La mesure de ces émissions permet de connaître le module du champ magnétique terrestre. Le magnétomètre à vapeur de Césium de G-858 de Geometrics (Ltd) fonctionne selon ce principe et permet d'obtenir une mesure avec une précision de 0,01 nT.



Figure 22 : Magnétomètre à vapeur de Césium, G-858 (Geometrics) en mode pseudo-gradient vertical

L'utilisation de deux sondes placées sur la même verticale permet de réaliser une mesure de pseudo-gradient vertical du module du champ magnétique terrestre (fig. 22). Comme pour les sondes fluxgate on préférera le terme de pseudo-gradient à gradient car il tient compte de la distance, faible et non- infinitésimale entre les deux capteurs (Hulin 2007). On peut alors éliminer les variations temporelles du champ puisque leur effet est le même sur les deux capteurs.

3.3 La prospection électromagnétique

3.3.1 Historique

Après la seconde guerre mondiale, le développement d'appareils électromagnétiques en archéologie était orienté vers la détection d'objets métalliques. Très vite il est apparu que ces techniques étaient en mesure d'apporter des informations sur la présence d'autres matériaux, comme les terres cuites (du Mesnil du Buisson 1948). Ces techniques permettaient de reconnaître sur le terrain les phénomènes observés par Tellier en laboratoire en 1938. C'est dans les années 60 que l'on a commencé à utiliser les méthodes électromagnétiques basse fréquence pour la recherche de structures archéologiques (Scollar 1962). Une étude théorique a montré que le SCM, premier appareil à géométrie Slingram, permettait de mesurer simultanément la susceptibilité magnétique et la conductivité électrique (Howell 1966). Il s'en est suivi des développements qui ont aboutis à la réalisation, entre autre, du CS60. La première prospection de viscosité magnétique a été réalisée avec le DECCO un appareil TDEM à boucle coïncidentes (Colani et Aitken, 1966a). Pour la mesure de la viscosité, les appareils Slingram TDEM sont apparus bien plus tard (Tabbagh et Dabas 1998, Thiesson *et al.* 2007)

3.3.2 Principe généraux

Les phénomènes électromagnétiques sont régis par les équations de Maxwell. Pour les basses fréquences, les courants de déplacement du champ électromagnétique sont négligeables devant les courants de conduction.

$$\varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \ll \sigma E$$

Cette approximation permet de réduire les équations de Maxwell à l'équation de diffusion suivante:

$$\nabla^2 E - \sigma \mu \frac{\partial E}{\partial t} = 0$$

Dans ce cas, les courants induits par un champ électromagnétique - dit primaire - ont tendance à se concentrer au voisinage de la surface. Ce phénomène est appelé l'effet de peau. La fréquence influe alors sur la profondeur d'investigation de l'appareil. Dans le cas général, la conductivité électrique gouverne principalement la réponse du sol (McNeil 1980a).

3.3.3 Les appareils électromagnétiques fréquentiels

3.3.3.1 Le faible nombre d'induction (LIN)

Si on respecte le faible nombre d'induction, avec L , la longueur caractéristique (taille de la structure, écartement entre émission et transmission, diamètre de la boucle), la profondeur d'investigation n'est plus déterminée par la fréquence d'émission du champ électromagnétique mais par cette longueur caractéristique - distance entre les bobines ou la taille de la boucle - (Benech et Marmet 1999). Dans ce cas, la réponse en phase est proportionnelle à la susceptibilité magnétique du sol, et la réponse en quadrature à sa conductivité (Tabbagh 1986a).

$$L^2 \sigma \mu \frac{\partial}{\partial t} \ll 1$$

3.3.3.2 Les appareils Slingram

Les appareils Slingram sont constitués de deux bobines, qui se comportent comme des dipôles magnétiques. Si ce type d'appareil respecte le LIN, on peut alors mesurer simultanément la conductivité électrique et la susceptibilité magnétique (Tite & Mullins 1969, Tabbagh 1974).

Le champ primaire H_p émis par la bobine d'émission entraîne la formation de courants dits de Foucault, dont l'intensité dépend de la conductivité du sol. Le champ aussi va induire un nouveau champ proportionnel à la susceptibilité magnétique du sol. Il résulte de la somme du champ initial, de l'aimantation induite et des courants de Foucault un champ secondaire H_s enregistré par la bobine de réception. La réponse du sol est alors donnée par le rapport du champ secondaire sur le champ primaire H_s/H_p .

Si la conductivité est suffisante, la réponse en quadrature rend compte de la conductivité électrique. Si la conductivité est trop faible la viscosité magnétique (susceptibilité en quadrature de phase) peut avoir un effet être significatif sur la réponse en quadrature du champ primaire (Parchas et Tabbagh 1978). En effet, la viscosité magnétique, partie en quadrature de la susceptibilité magnétique, se superpose algébriquement à celle de la conductivité. Pour deux fréquences d'émission, la susceptibilité en phase n'est pas constante contrairement à la susceptibilité en quadrature (Mullins et Tite 1973, Dabas 1989). Il serait donc possible de déterminer simultanément la susceptibilité magnétique, la conductivité électrique et la viscosité magnétique d'un milieu à partir d'un même et seul appareil soit un gain de temps et d'information très important.

Du point de vue pratique, l'intérêt des appareils Slingram réside dans la facilité avec laquelle on peut les déplacer, ceux-ci ne nécessitent pas de contact avec le sol et sont peu encombrants.

3.3.3.3 Les configurations

Les configurations de bobines les plus couramment utilisées sont, perpendiculaire (PERP), vertical co-planaire (VCP) et horizontal co-planaire (HCP). VCP et HCP sont les plus couramment utilisées (fig. 23). On les retrouve majoritairement sur les appareils commerciaux car HCP est plus sensible aux variations de conductivité électrique et présente une profondeur d'investigation plus importante (Benech et Marmet, 1999). VCP est réalisable par une simple rotation de l'appareil. Les mesures HCP et VCP peuvent donc être mise en œuvre assez facilement à partir d'un même appareil.

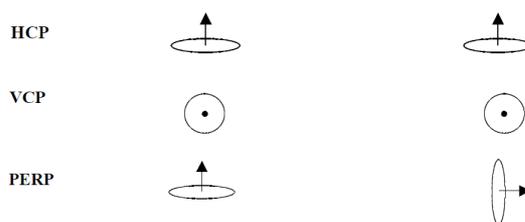


Figure 23 : Configuration des bobines EM Slingram (Tabbagh 1986b)

La meilleure configuration à des fins de prospection archéologique serait plutôt la configuration PERP, mais elle implique un décalage du maximum de l'anomalie (Tabbagh 1986b). Le problème des appareils Slingram réside dans la réjection de l'effet direct du champ primaire sur la réceptrice ce qui nécessite une très bonne rigidité du support mécanique.

3.3.3.4 Le CS60



Figure 24 : Le conductivimètre-susceptibilimètre CS60 (Laboratoire Sisyphe)

Le CS60 est un appareil électromagnétique Slingram fréquentiel qui mesure simultanément la conductivité électrique et la susceptibilité magnétique (Job *et al.* 1995, Thiesson 2009, Thiesson 2011). L'écartement entre les bobines, en configuration co-planaire, est de 60 cm. La fréquence de

fonctionnement est de 27960 Hz. On peut utiliser cet appareil en mode VCP et HCP (fig. 24). La profondeur d'investigation est de 40 cm pour le signal en phase et de 80 cm pour le signal en quadrature. Les déformations de l'appareil, même minimes, entraînent une importante dérive du signal en phase. L'enregistrement des mesures se fait de manière disjointe sur un ordinateur terrain : la connexion étant assurée par une liaison bluetooth ou un câble. Pour obtenir une mesure absolue il faut estimer le zéro de l'appareil ainsi que la réponse de l'appareil sur un terrain tabulaire aux propriétés électriques connues.

3.3.3.5 L'EM 31

L'EM 31 est un appareil électromagnétique fréquentiel Slingram développé par Geonics Ltd. Les bobines sont distantes de 3,66 m et la fréquence d'émissions du signal est de 9,8 kHz (McNeill 1980a). Sa profondeur d'investigation est d'environ 6 m en HCP et légèrement moins en VCP. On s'intéresse exclusivement à la réponse en quadrature qui correspond à la mesure de la conductivité du sol dans l'hypothèse du faible nombre d'induction. Avec cet écartement la rigidité n'est plus assurée et le signal en phase n'est plus représentatif des valeurs de susceptibilité magnétique.

3.3.3.6 Les appareils à boucle

Les appareils à boucles ont une très faible profondeur d'investigation. Ils rendent compte des propriétés magnétiques sur un faible volume de sol.

3.3.3.7 Le MS2



Figure 25 : Le susceptibilimètre MS2-D (Bartington)

Pour mesurer la susceptibilité magnétique volumique, on utilise le MS2-D de Bartington (fig. 25), un appareil électromagnétique fréquentiel à boucle qui fonctionne à une fréquence de 958 Hz avec

une période de mesure de 0,5 seconde et une précision est de 2%. Sa profondeur d'investigation de 10 cm, rend compte de la quantité et de la variabilité des grains magnétiques en surface. Il peut être utilisé avec une autre sonde (le MS2-B) en laboratoire sur des échantillons de 10 cm³ (préalablement séché à l'étuve à une température de 105°C). Cette sonde mesure la susceptibilité magnétique massique à deux fréquences (0.465 et 4.65 kHz +/- 1 %) d'où l'on déduit la dépendance fréquentielle de la susceptibilité magnétique de l'échantillon.

3.3.4 Les appareils électromagnétiques temporels (Time Domain, TDEM)

Dès les années 60 on a découvert que les appareils TDEM sont sensibles aux fossés qui présentent une viscosité magnétique significative (Colani et Aitken 1966b). L'ensemble des résultats expérimentaux (Mullins et Tite 1973) est synthétisé dans la thèse de Dabas (Dabas 1989).

3.3.5 Principe

Pour les appareils temporels, on émet un champ électromagnétique impulsionnel qui entraîne la formation de courants de Foucault et une aimantation induite dans les matériaux magnétiques. Après la coupure du champ les phénomènes induits par le champ émis ne s'annulent pas instantanément. Pour les temps très courts, la majeure partie du signal enregistré est due à la conductivité électrique. Pour les temps plus longs : on enregistre l'aimantation visqueuse qui ne s'annule pas immédiatement en raison de la viscosité des matériaux.

3.3.6 Le VC100

Le VC100 est un appareil électromagnétique Slingram temporel (Thiesson *et al.* 2007). Les bobines sont distantes de 1,1 m. Après la coupure du champ émis on mesure le signal électromagnétique en 5 temps : de 12.2 μ s à 178 μ s. Le signal sur le premier temps est encore fortement influencé par la conductivité électrique. Ce signal est théoriquement comparable au signal en quadrature enregistré sur le CS60. La configuration PERP des bobines permet de s'affranchir au mieux de l'influence de la conductivité électrique et de la susceptibilité magnétique. L'émetteur génère une impulsion paramétrable et le récepteur échantillonne et numérise les mesures.

PARTIE II : ANALYSE
CRITIQUE DE PROSPECTIONS DE SITES EN ALSACE

1 La géophysique et l'archéologie en Alsace

Avant d'envisager le rôle qui peut être celui de la prospection géophysique au sein de l'archéologie préventive il est indispensable de comprendre quelle est son apport dans l'étude archéologique d'un site. La présente étude se limite au territoire alsacien qui a la particularité de présenter une grande diversité de contextes géologiques et géographiques qui ont façonné au fil du temps les paysages et l'occupation de l'espace (fig. 26). Les secteurs aménagés du fait de la forte pression économique se concentrent en bordure du Piémont vosgien, dans la plaine rhénane ou sur les collines calcaires et lœssiques qui lui font face. En conséquence, il a été choisit de présenter les sites selon leur appartenance à des grandes entités que sont le piémont des Vosges et ses collines, les collines calcaires et les terrasses lœssiques (où on intégrera par commodité les collines du Nord de l'Alsace, le Sundgau et l'Alsace Bossue) et la plaine d'Alsace. Ce choix a été imposé par les spécificités en termes de type de sol, d'évolution naturelle et d'occupation ou type de vestiges de chaque ensemble. On peut par exemple citer la prédominance des bâtiments en pierre dans les collines calcaires pour la période antique alors que dans la plaine, le matériau majoritairement utilisé semble être le bois jusqu'à l'époque moderne.

Nous présenterons donc dans un premier temps les caractéristiques de la région, tant climatiques que géologiques, afin de définir ces différents ensembles. Nous traiterons ensuite succinctement de l'aménagement du territoire alsacien ainsi que de l'occupation du sol. Ces derniers aspects sont essentiels pour comprendre les problématiques de l'archéologie préventive liée à l'aménagement mais aussi à l'accessibilité des terrains.

Les sites seront ensuite présentés d'abord dans leur contexte général, géomorphologique et archéologique puis l'apport de la géophysique y sera à chaque fois mis en perspective. Il ne s'agit pas là de faire une étude détaillée de chaque anomalie mais de comprendre pourquoi elles sont ou non observables et ce que l'identification d'anomalies apporte à l'étude archéologique, à la détection des vestiges, à la compréhension de l'organisation d'un site et de son intégration dans la dynamique du territoire archéologique.

Ces présentations de terrains souffrent du manque de mesures complémentaires sur les niveaux observées et les comblements de structures (mesure ponctuelle de susceptibilité magnétique, analyse en laboratoire des propriétés magnétiques, texture des matériaux, ...). Ces lacunes sont les résultats d'une contrainte de temps qui caractérise l'archéologie préventive en général. La réflexion menée, en l'absence de ces données complémentaires et avec les impératifs méthodologiques qu'impose le terrain, est donc représentative d'une réalité pratique.

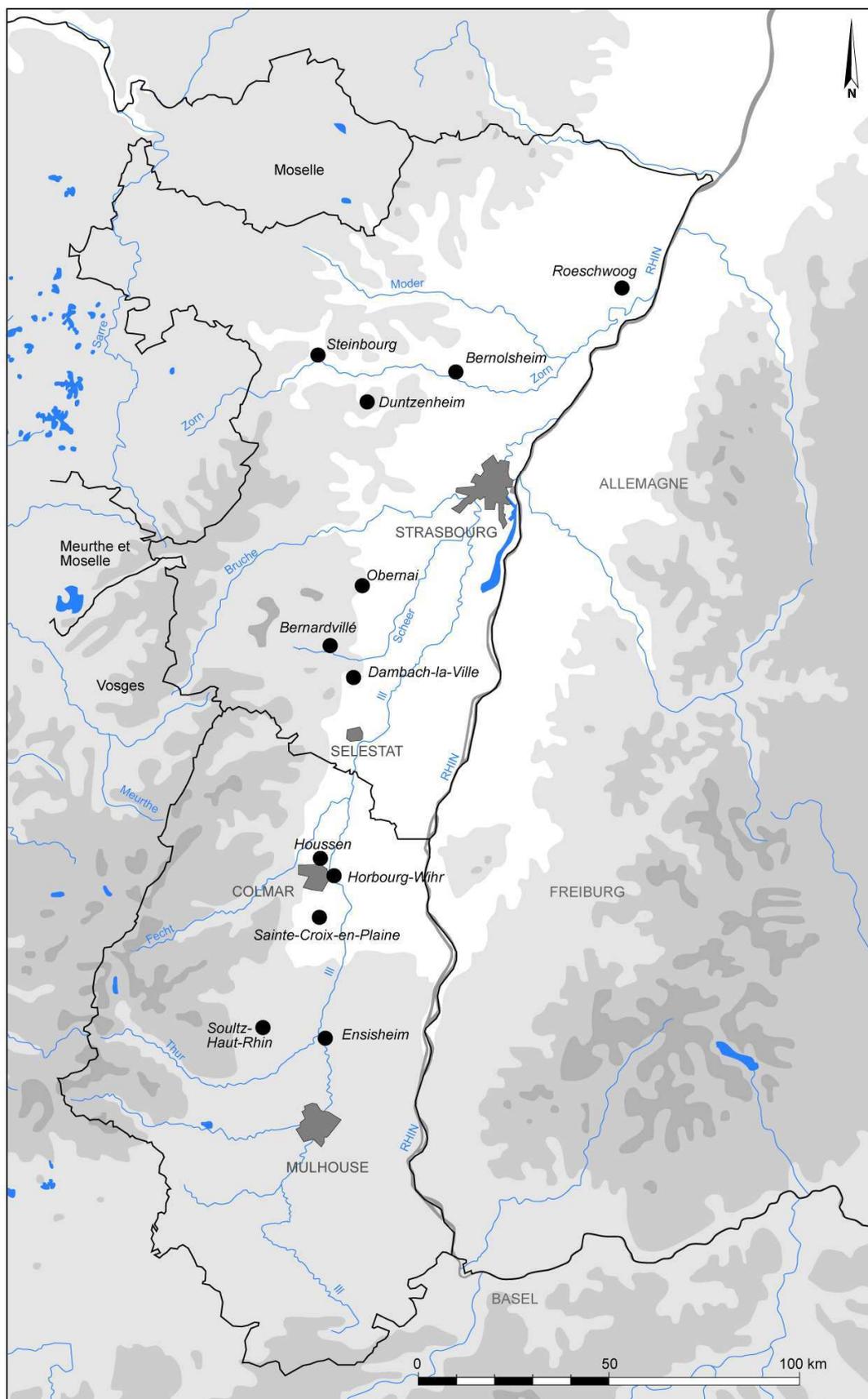


Figure 26 : Carte de répartition des études géophysiques de sites archéologiques

2 Contexte environnemental et aménagement du territoire

2.1 Le climat alsacien

Le climat a une forte influence sur les propriétés physiques des formations superficielles. Il conditionne leur évolution dans le temps et modifie les caractéristiques physiques des sols sur lesquels on réalise les mesures (Sell 1998).

L'Alsace, située dans le domaine climatique de l'Europe occidentale, subit les influences climatiques continentales de l'Est et océaniques de l'Ouest. Son relief entraîne une grande diversité de microclimats qui sont le fait des différences d'altitude et d'exposition, de l'influence des reliefs environnants et dans une moindre mesure de l'occupation humaine de l'espace. Cette diversité climatique et topographique entraîne des changements météorologiques soudains. Les périodes de stabilité excèdent rarement 5 jours.

Au printemps, des épisodes chauds alternent avec des périodes de redoux marquées par des giboulées et des éclaircies. Dans les fonds de vallées mal ventilés on peut observer des gelées jusqu'à fin mai. En été le climat est chaud avec des températures de 30 à 35 °C : le manque de vent associé à la forte évapotranspiration des plantes augmente la teneur en vapeur d'eau de la masse d'air jusqu'à provoquer des orages de chaleur. Le contact entre l'air chaud du continent et les arrivées d'air froid océanique donne lieu à des orages mais les masses océaniques arrivant depuis l'océan occasionnent de faible pluie. De fait, l'Alsace est très rarement touchée par des épisodes de sécheresse. Un temps anticyclonique persiste souvent jusqu'en octobre.

2.1.1 Températures

La température moyenne annuelle est de 10°C environ avec un gradient thermique de 0.5°C/100 m vers les Vosges. En hiver, la température descend rarement en dessous de -20°C ce qui n'empêche pas 80 jours de gelées en plaine (contre 120 jours à 1000 m d'altitude). En été elle dépasse rarement 35°C, avec 45 jours environ à plus de 25°C. La plaine a une amplitude thermique apparentée au climat continental plus importante que sur les sommets vosgiens où elle est comparable au climat océanique (Sell 1998).

2.1.2 Précipitations

La topographie contrastée de la région a une forte influence sur les précipitations. Le régime hydrologique en plaine est continental avec peu de précipitations en été et beaucoup en hiver, alors que sur les Vosges apparentées au régime océanique il pleut plus en été et moins en hiver. La fréquence

des précipitations est élevée sur l'ensemble de la région. Il pleut entre 190 et 200 jours dans les Vosges contre 150 jours en plaine. On observe une augmentation des lames d'eau par effet orographique sur les crêtes qui peut atteindre 2300 mm par an sur les Ballons d'Alsace. Elle n'est que de 700 mm en Centre Alsace et est légèrement plus importante au nord et dans le Sundgau. L'effet de foehn, dû au massif vosgien, explique les faibles précipitations en plaine en contrebas de la crête des Vosges, il est moins marqué dans les zones septentrionales et méridionales où les sommets sont plus bas (Sell 1998).

2.1.3 Bilan

Les contrastes assez importants de températures et de précipitations entre les différentes saisons peuvent expliquer l'importante variabilité de la conductivité électrique observée au cours d'un cycle annuel.

En été, période où les terrains sont le moins accessibles du fait des cultures, les mesures électriques sont très sensibles au manque d'eau qui amplifie les résistances de contact à la surface du sol. En hiver le sol est gorgé d'eau, les terrains sont alors propices à la prospection électrique du fait d'un bon contact à l'exception des sols labourés secs en surface. Au cours des mois de décembre à février, il arrive fréquemment que le sol soit gelé. Mis à part ces courts épisodes, la disponibilité des terrains agricoles en hiver rend la prospection électrique propice à la détection de vestiges.

Les propriétés magnétiques sont beaucoup moins sensibles à ces variations annuelles de température. En revanche l'effet des fortes variations de précipitations et de températures d'une saison à l'autre, a favorisé la pédogenèse qui modifie la nature minéralogique des grains magnétiques.

2.2 Géologie de l'Alsace et définition des grands ensembles structuraux

2.2.1 Géologie structurale d'Alsace

L'Alsace est le résultat d'un épisode géologique majeur qui a façonné son relief et sa géographie (fig. 27) ; le rift rhénan, produit de la tectonique pliopléistocène, se caractérise ainsi par de grands traits morphologiques : des massifs bordiers dissymétriques –les Vosges et la Forêt Noire –, une zone de piémont, et le fossé rhénan - la plaine d'Alsace -, dépression dans laquelle s'écoule le Rhin (Vogt 1992).

Le rift s'est développé sur des zones de faiblesses qui ont engendré l'effondrement du fossé rhénan. Des failles normales subméridiennes ont entraîné un décalage vertical des formations sédimentaires de 500 à plusieurs milliers de mètres : on retrouve par exemple les mêmes formations sur le Taenchel à 700 m d'altitude, et à 1600 m de profondeur sous Ostheim (soit un décrochement vertical de 2300 m).

La morphologie de la plaine, qui s'étend sur 300 km de Bâle à Mayence sur une largeur de 35 à 45 km, est moins marquée par cette activité tectonique. Néanmoins, un affaissement au quaternaire a provoqué la formation du Ried Centre Alsace, et des remontées de dômes de sel près d'Ensisheim empêchent l'Ill de rejoindre le Rhin en amont de Strasbourg.

Les collines sous-vosgiennes sont le produit de ce système complexe de champ de failles : différents compartiments sédimentaires de la fin de l'ère primaire au tertiaire, marqué par des failles, des talus, des basculements et des affaissements longent le massif vosgien. L'ensemble de ces collines est délimité par la faille vosgienne qui les sépare du massif vosgien et par la faille rhénane qui les sépare de la plaine. Elles sont traversées par les cônes de déjection des rivières.

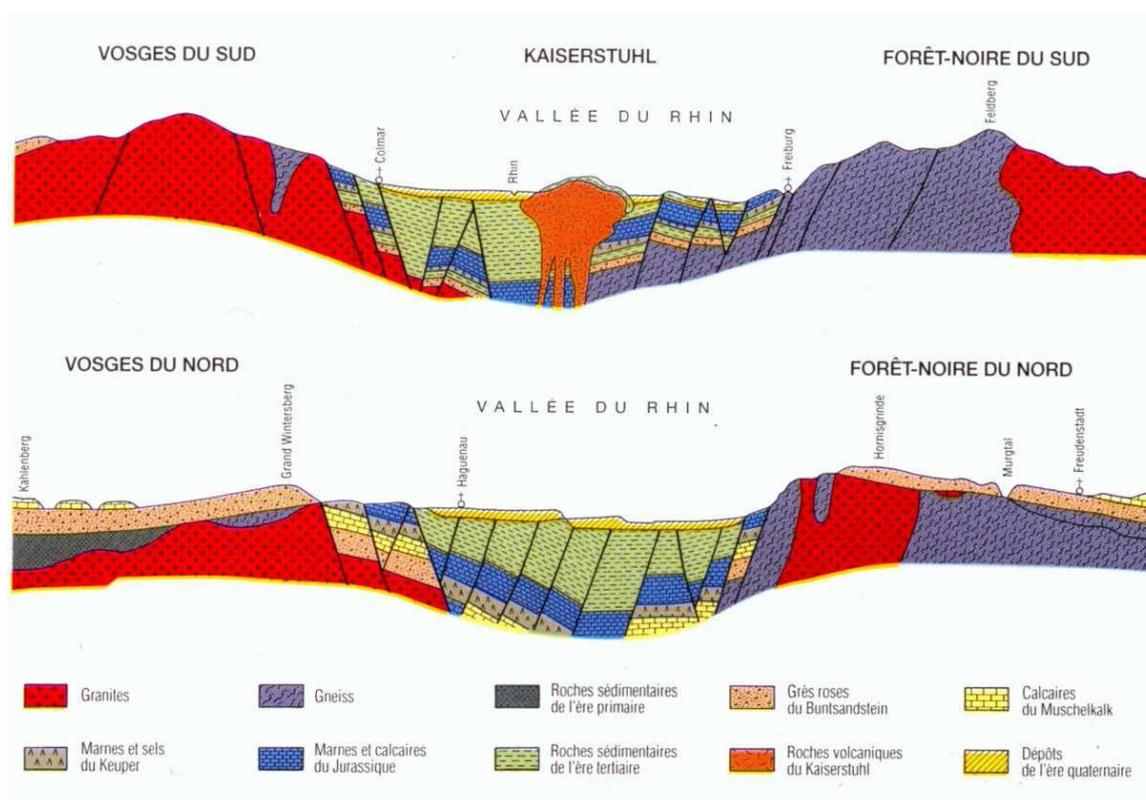


Figure 27 : Coupe structurale du fossé rhénan au nord et au sud du massif vosgien (Ertlen 2009)

Le Jura alsacien, appelé Jura de Ferrette, est le résultat d'un chevauchement de la partie méridionale du fossé rhénan au début du Pliocène. Il en résulte des chaînons calcaires anticlinaux séparés par des dépressions marneuses. Ce système calcaire a permis la formation d'un système karstifié.

2.2.2 Les grands ensembles structuraux

2.2.2.1 Les Vosges et le piémont

On peut différencier sur le massif vosgien deux ensembles :

- Les Vosges gréseuses au Nord
- Les Vosges cristallines hercyniennes avec dans la partie méridionale des granites carbonifères et dans les Vosges moyennes des formations métamorphiques

Dans les parties sommitales, les roches anciennes affleurent. Ce massif présente une pente douce au Nord et à l'Ouest.

2.2.2.1.1 Vosges cristallines

Les Vosges cristallines sont situées au sud de la vallée de la Bruche et culminent à plus de 1000 m, avec une forte pente à l'Est (15 à 40%). Elles sont constituées de roches cristallines (granites), de roches cristallophylliennes (schistes et grauwackes), ainsi que d'autres formations métamorphiques (gneiss, migmatites) et sédimentaires (grès et formation marno-calcaire). Les fonds de vallées ont été surcreusés par les glaciers et permettent aujourd'hui un apport important de sédiments grossiers au réseau hydrographique, régi par la nature lithologique des bassins versants, les écoulements superficiels et les pentes de versants (Sell 1998).

2.2.2.1.2 Vosges gréseuse

Au nord, les Vosges sont essentiellement gréseuses (Trias inférieur). A l'Est, la rupture est marquée par la faille vosgienne avec la formation d'escarpements abrupts. Au Nord, les plateaux culminent à 500 m d'altitude et présentent une pente moyenne vers l'Est. Il en résulte des vallées longues et étroites, où, par manque d'énergie des cours d'eau, la charge sédimentaire abondante s'accumule et ensable les chenaux (Sell 1998).

2.2.2.1.3 Piémont

Ce système fracturé s'étend de la Doller - au sud -, à Wasselone - au nord -, à de faibles altitudes (entre 200 et 400 m). Le vignoble, omniprésent sur cette formation propice à son développement entraîne une très faible retenue d'eau, la surface du sol y est chaude et sèche.

Des lithosols se sont développés sur les bancs calcaires du piémont des Vosges cristallines, et des rankers et rendzines sur les sommets. Les sols bruns calcaires, voire calciques, près du massif sont dus

aux alternances marno-calcaires. Les marnes associées aux dépressions entraînent la formation de gleys avec des conditions d'hydromorphie quelques fois permanente.

Les collines du piémont des Vosges gréseuses, situées dans le champ de fracture de Saverne, présentent de fortes variations de nature géologique, essentiellement marno-calcaire et gréseuses. Au contact des Vosges, les plateaux gréseux entaillés ont favorisé l'installation de forêts alors qu'à l'est le bas du versant est marqué par des placages de lœss. Cette région subit un régime hydrique légèrement plus important qu'en plaine, de 900 mm par an.

2.2.3 Les collines calcaires et terrasses lœssiques

2.2.3.1.1 *Sundgau*

Le Sundgau est situé au pied des Vosges, dans la partie méridionale de l'Alsace. Cette région s'étend du fossé de Sierentz à l'est, au Vosges à l'ouest, au Jura Alsacien au sud et au cône alluvial de la Thur au nord. Il correspond à des marnes oligocènes qui ont conditionné la formation de vallées évasées avec de faibles pentes. Ces collines dominent la plaine ello-rhénane et leur substrat est un compartiment surélevé marno-calcaire (d'origine marine et lacustre) du Horst de Mulhouse. L'influence des forts vents océaniques et d'une forte humidité a entraîné la formation d'un dense système hydrologique. Dans la partie septentrionale - le Bas-Sundgau situé au sud du fossé tectonique de Dannemarie et dans la partie la plus élevée du Horst - on observe un recouvrement lœssique plus récent et l'absence de nappe alluviale. Au sud, le Haut Sundgau est constitué de plateaux incisés par des interfluves et surmontés de cailloutis rhénans pliocènes (Sell 1998). Pouvant atteindre une puissance stratigraphique de 30 m, les lœss anciens, décalcifiés par lehmification rendent les sols imperméables. Associé à de fortes précipitations (1000 à 1200 mm par an), ils rendent les sols impropres à l'agriculture par la formation de gleys et pseudo-gleys plutôt favorables à l'établissement de prairies, étangs et pâturages.

2.2.3.1.2 *Collines marno-calcaires et lœssiques du Nord de l'Alsace*

Les collines marno-calcaires et lœssiques du Nord de l'Alsace s'étendent entre la plaine d'Alsace et les Vosges gréseuses, de la Lauter à la Bruche. Entre Wasselone et Wissembourg, les collines à dominante marno-calcaire, ont un recouvrement lœssique faible et discontinu, alors qu'à l'Est sur le Kochersberg et dans la région de l'Outre-Forêt, la couverture lœssique est continue et d'une épaisseur pouvant atteindre une dizaine de mètres. Les niveaux décalcifiés en surface fournissent des sols agricoles riches. La forte teneur en calcaire donne en profondeur une teinte claire aux sédiments.

Au Nord, les collines calcaires alternent avec des dépressions marneuses. Le soubassement est varié et complexe, notamment dans la région de l'Outre-Forêt. Il en résulte des sols très diversifiés :

- Sur les grès, des sols bruns acides, parfois des podzols
- Sur les calcaires, des sols calcimagnésiens, ou des rendzines plus ou moins brunifiés
- Sur les marnes, des formations de pseudo-gleys et de limons de sols brunifiés ou lessivés

Dans le Kochersberg, le système de collines et de terrasses est traversé par les cônes de déjection sableux des rivières vosgiennes. Les lœss participent au développement de sol brun calcaire limoneux bien drainés (fig. 28).

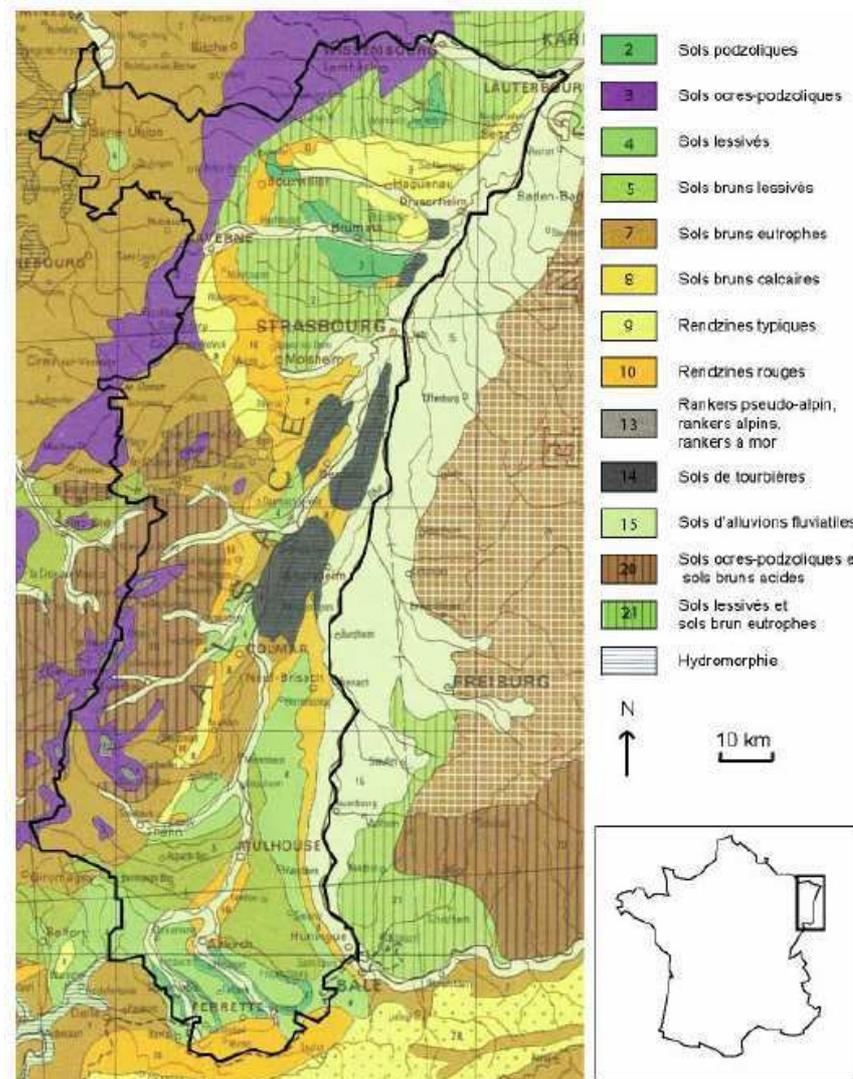


Fig. 5.6 : Extrait de la carte pédologique de la France au 1 000 000e (Dupuis, 1966).

Figure 28 : Carte pédologiques de l'Alsace (Erlten 2009)

2.2.3.2 La plaine

La plaine d'Alsace peut se subdiviser en deux ensembles majeurs : au Sud une terrasse würmienne et au Nord des dépôts alluviaux fins holocènes le long de la bande rhénane et dans le Ried. Ces deux formations récentes sont traversées par le Rhin et l'Ill. Plusieurs cônes de déjection des rivières vosgiennes, dont le plus important porte la forêt d'Haguenau, s'étendent dans la plaine au débouché des vallées.

2.2.3.2.1 Formation de la plaine du Rhin

Le fossé rhéan s'est formé au Tertiaire. Au Quaternaire, après un deuxième épisode de fontes succédant aux grandes glaciations (Günzel, Mindel, Riess et Würm), le Rhin s'est mis à couler vers la mer du Nord en empruntant le fossé rhéan formant alors un torrent de plusieurs kilomètres de large qui a charrié une masse considérable de sables et de galets d'origine alpine. Après la dernière glaciation, au Würm (12 000 BP), le Rhin a divagué dans la plaine en changeant couramment de lit, créant des profils transversaux entrecroisés de barres fluviales, (système anastomosé). Ceci constitue l'un des plus vastes cônes de déjection d'Europe. L'Ill, naturellement contrainte par des dépôts fluviaux à l'Ouest du Rhin et au sud de Strasbourg, s'est installée dans une dépression marginale où elle développe son propre système hydrographique. Le Ried et la Hardt se sont différenciés à partir du moment où les apports alluvionnaires se sont majoritairement déposés dans le lac de Constance. L'épaisseur actuelle des sédiments alluviaux rhénans est de 235 m à Colmar, 75 m à Strasbourg et seulement 8 m à Seltz.

2.2.3.2.2 Le Rhin

Dans la partie sud, le Rhin cisaille, en une vallée étroite, sa propre terrasse würmienne constituée de sables et de dépôts grossiers perméables, adoptant un système en tresses et anabranes. L'incision a pour effet l'abaissement de la surface piézométrique sur la largeur de la terrasse. Dans cette partie de la plaine, les bombements correspondant aux diapirs empêchent l'Ill de se déverser dans le Rhin.

Entre Breisach et Strasbourg, le lit majeur s'étale sur 4 à 6 km et, avant les travaux d'aménagements, le Rhin pouvait atteindre 20 km de large. Jusqu'à Marckolsheim l'accumulation de l'épandage alluvial de l'holocène, notamment les dépôts du matériel prélevé sur la terrasse würmienne, est très conséquente, alors qu'ensuite les alluvions deviennent plus fines.

Au nord de Strasbourg, le lit majeur du Rhin est limité par un talus qui borde la terrasse de Bischheim, le cône de déjection de la Zorn, les formations pliocènes d'Haguenau et les collines

marno-calcaires de l'Outre Forêt. Le système méandrique devient un système à chenaux multiples, la longueur d'onde des méandres et anabranches pouvant atteindre 4 km. Les autres rivières se mêlent alors au système rhénan.

2.2.3.2.3 L'Ill

Entre Mulhouse et Colmar, l'Ill présente une configuration de type méandres divaguant, encore actifs avant sa rectification. Elle sort de la terrasse würmienne à la hauteur de Horbourg, dans le même secteur que la Thur et la Lauch, puis elle longe la terrasse d'Erstein, produit d'un soulèvement tectonique.

2.2.3.2.4 Le Ried

Le Ried alsacien comprend plusieurs sous-ensembles : le Ried de l'Ill, délimité par la zone d'inondation de la rivière et alimenté par plusieurs rivières phréatiques comme la Blind ou la Zembs au nord. Le Ried rhénan à l'est en périphérie du Rhin est sillonné par des bras morts d'anciens chenaux. L'association de ces deux rieds forment le Ried centre alsace.

Les différents Rieds, qui se jouxtent, se réunissent en plaine en aval de la ligne Colmar Marckolsheim où ce système devient prédominant.

Chaque entité tire son nom de la couleur du sol (fig. 29):

Le Ried noir est un sol riche en matière organique décomposée, avec un horizon humifère composé de tourbe, qui repose sur une couche de gley contenant du fer oxydé (sous forme de fer ferrique) dans la partie supérieure et du fer réduit (fer ferreux) dans la partie inférieure, produit par les battements de la nappe qui est ici associée à la légère surélévation de l'Ill et du Rhin. Il est formé par la dépression entre l'Ill et le Rhin de Colmar à Erstein. Ces niveaux hydromorphes évoluent vers des sols de type marais calcique à sols hydromorphes.

Le sol du Ried gris est caractérisé par la transformation avancée de la matière organique, où on observe une forte proportion d'éléments minéraux fertilisants. Ces niveaux superficiels reposent sur des couches de gleys, dues à la nappe toujours proche de la surface qui implique des sols humides.

Le Ried brun est un horizon humifère actif, avec peu de matière organique et des loëss décalcifiés par lessivage des eaux de surface qui scelle un niveau de gleys marqué par des tâches d'oxydation de couleur rouille.

Le Ried blond est formé de sables et de limons récents de couleur claire correspondant aux dépôts rhénans. On distingue d'autres rieds sur le territoire Alsacien notamment le Bruch de l'Andlau, le Ried de la Thur, le Ried de la Bruche, et le Ried Nord Alsace.

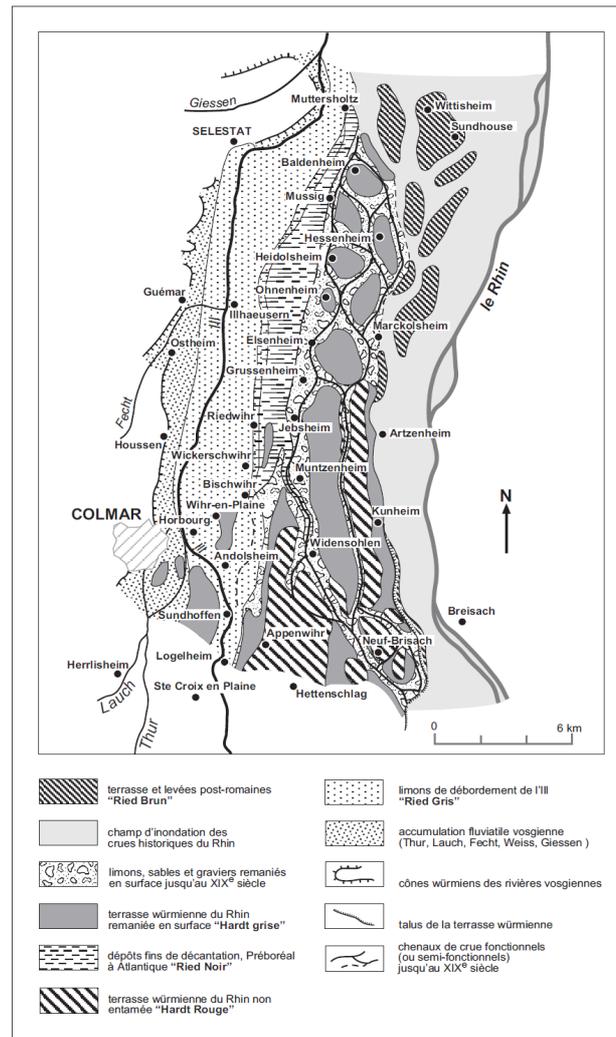


Figure 29 : Transition entre la terrasse würmienne et les formations géomorphologiques du Grand Ried Central d'Alsace (Schmitt 2001)

2.2.3.2.5 La Hardt

La Hardt est formée par la terrasse würmienne. On y observe des sols à horizon rouge (caractéristiques de la forêt de la Hardt) sur des poudingues calcaires, des sols formés sur des dépôts de limons et des sols formés sur des loëss. Les sols à horizon rouge sont marqués par une rubéfaction des horizons superficiels, survenue lors des épisodes climatiques chauds et humides.

2.2.3.3 Les cônes de déjection

L'apport de sédiments aux débouchés des vallées vosgiennes forme des cônes de déjection (Zorn, Lauter, Thur, Doller, Giessen, Fecht). Au sud, les torrents charrient des charges solides de

substrat caillouteux grossier alors qu'au nord, les rivières des Vosges gréseuses déposent majoritairement des sédiments sableux donnant naissance à des sols perméables. Dans ces rivières, le lit majeur est occupé toute l'année mais présente une alternance avec de seuils peu profonds à courant rapide et de fosses à eaux stagnantes. En été, seules les zones les plus profondes sont encore en eau. En plaine, aux débouchés des vallées, les rivières s'élargissent et déposent des matériaux plus fins. Au nord de Strasbourg, la terrasse de Haguenau correspond à un cône de déjection cisailé par le Rhin et les rivières vosgiennes.

2.2.3.4 Aménagement du Rhin et de l'Ill

A la fin du 18^{ème} siècle, le Rhin a été endigué en vue de le rendre navigable et de diminuer l'impact des inondations. Ces travaux ont entraîné de grands changements dans le comportement du fleuve, avec un impact sur les sols et la géographie encore marqué aujourd'hui. Paradoxalement, cette rectification a provoqué un courant trop important impropre à la navigation: des travaux supplémentaires de régulations et de canalisations ont donc été entrepris, avec des modifications mineures sur ce nouveau système hydrologique. En plaine, les berges de l'Ill ont aussi été aménagées pour éviter des crues trop importantes.

Entre Bâle et Breisach, la rectification du Rhin a entraîné un abaissement de la nappe phréatique dû à une incision de 7 m du lit mineur. Les travaux de régulations qui ont suivi ont ensuite fait remonter la nappe de 1 m. Malgré une amplitude de battement de 2 à 3 m, la profondeur du toit de la nappe phréatique ne permet plus la résurgence de l'eau en surface, ce qui a provoqué une suppression brutale des inondations et la disparition des anabranes rhénanes subactuelles.

Entre Breisach et Strasbourg, la rectification a diminué le risque d'inondations avec un maintien des submersions dans le corridor intra-digues et une conservation partielle du système d'anabranes. Le courant a cependant été fortement atténué par les travaux de correction tandis que le niveau piézométrique a été maintenu dans la plaine.

Entre Strasbourg et Lauterbourg, l'abaissement du toit de la nappe est quasi-nul, les inondations dans l'ancien lit majeur ont été totalement supprimées par la construction de digues. Seules certaines îles artificielles sont encore menacées de submersion lors des périodes de hautes eaux. Avec l'atténuation des oscillations du toit de la nappe, le système anastomosé a été déstructuré, les rivières n'étant que ponctuellement alimentées par la nappe.

La rectification de l'Ill a été réalisée en créant un endiguement très étroit du lit majeur au 19^{ème} siècle. La dynamique a été atténuée par de nombreux barrages en aval d'Enwihr, ses importantes inondations en font cependant un hydrosystème encore très fonctionnel.

2.2.3.5 Conclusion

Ces différents éléments géologiques, climatiques et environnementaux nous ont permis de reconnaître trois ensembles majeurs non-continus mais sur lesquels les comportements des propriétés physiques et l'évolution des sols sont quasiment similaires (fig. 30). Une très forte variabilité peut néanmoins exister au sein de chaque ensemble. Le premier correspond au massif vosgien et à la zone de piémonts : cette zone de relief est très peu touchée par les travaux d'aménagement. Obernai est en limite de la zone de piémont, et Bernardvillé dans une petite vallée vosgienne. Le deuxième ensemble est constitué, des collines sous-vosgiennes et des terrasses lœssiques du nord de l'Alsace, où l'on situe Duntzenheim et Steinbourg, ainsi que Bernolsheim en limite du Kochersberg. Ces trois sites sont implantés dans le nord de l'Alsace, moins soumis à l'aménagement. Les deux premiers sites ont été étudiés dans le cadre d'un aménagement singulier, le tracé de la LGV Est Européenne liée à des grands travaux nationaux, le troisième dans le cadre d'un grand projet d'aménagement départemental. Enfin le troisième secteur correspond à la plaine, où nous distinguerons par commodité et par type de sols, les cônes de déjections avec Soultz et Dambach-la-Ville, les zones inondables et Rieds avec Roeschwoog, Houssen et Horbourg-Wihr ainsi que les terrasses de gravier avec Sainte-Croix-en-Plaine et Ensisheim, moins soumises aujourd'hui à l'aléa hydrologique de la région que dans le passé. Ces trois ensembles ne présentent effectivement pas les mêmes types de sols, qui sont liés à l'impact des rivières vosgiennes ou au Rhin, mais sont soumis à la même pression économique et démographique.

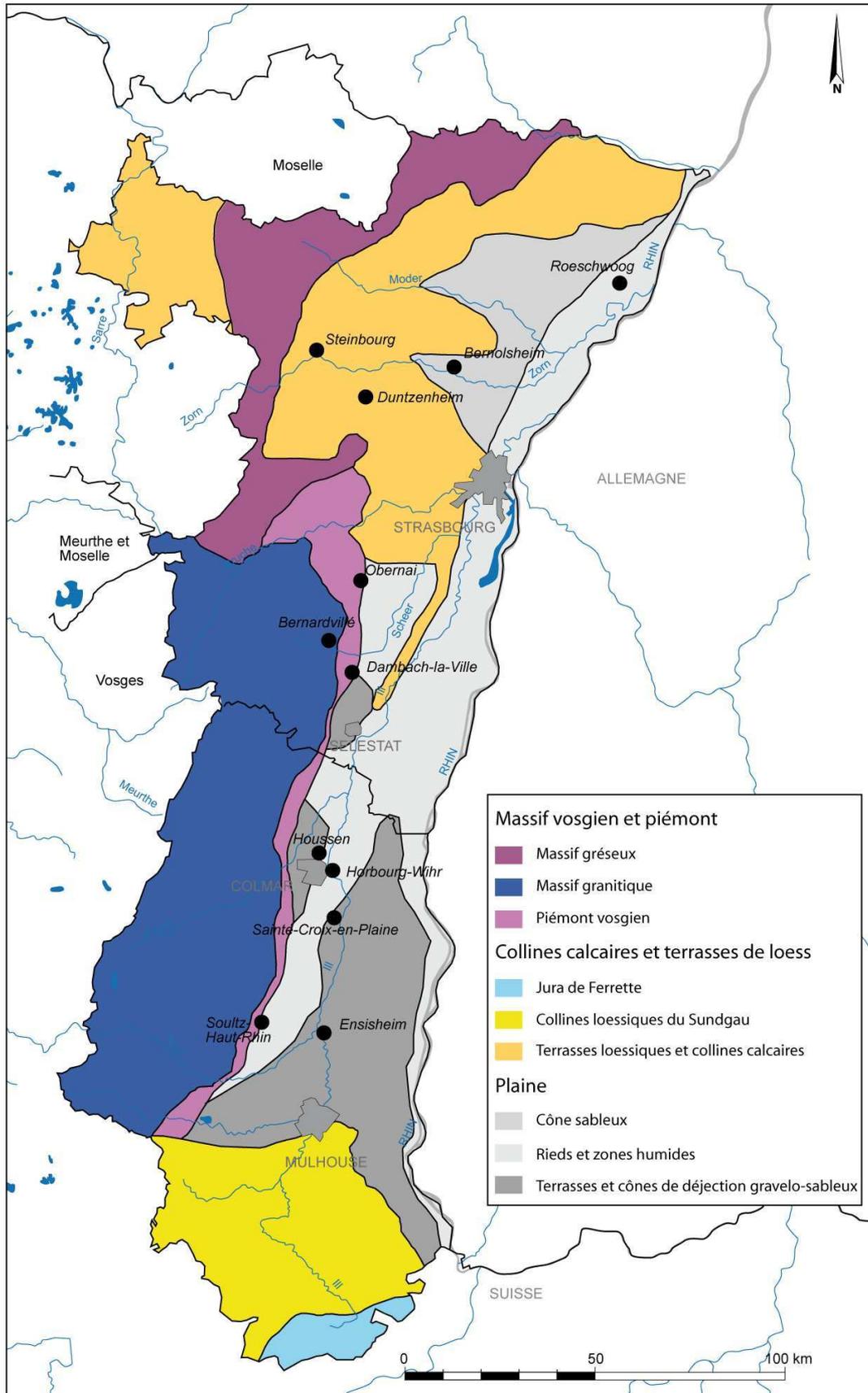


Figure 30 : Carte des entités géologiques alsaciennes définissant les trois entités géographiques (plaine, collines calcaires et loessiques, massif vosgien et piémont) (d'après Sell *et al.* 1998)

2.3 L'aménagement du territoire en Alsace

Une étude récente a été réalisée sur la mesure de l'étalement urbain sur le territoire alsacien (DREAL 2007). Elle dresse un bilan de la consommation foncière et des disparités qui existent au sein de la région. L'étalement urbain est un processus d'expansion de la ville hors de l'agglomération physique qui se manifeste par l'extension des espaces urbanisés à usage d'habitat ou d'activité. Il peut prendre plusieurs formes: l'extension urbaine significative ; le renouvellement urbain ou le remplissage interstitiel dans la trame urbaine existante ; l'extension ponctuelle ou linéaire. Les extensions urbaines significatives sont caractéristiques des grandes opérations sur la tache urbaine en frange de l'espace aggloméré, comme les zones d'activité ou les lotissements de maisons individuelles ce sont elles qui nous intéressent en premier lieu.

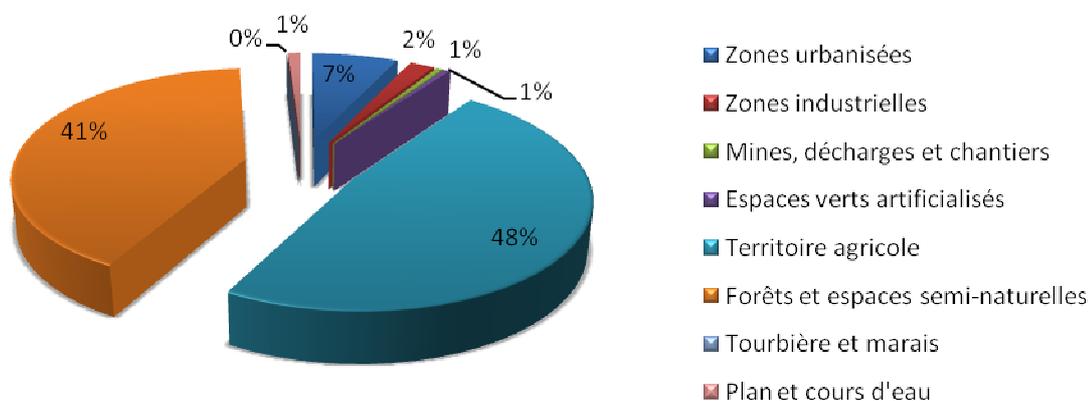


Figure 31 : Répartition fonctionnelle du territoire aménagé en Alsace en 2006 (données CorineLandCover)

Entre 1982 et 2000 en Alsace, 14 000 hectares ont été aménagés (fig. 31), soit environ 800 hectares/an (1/1000 de la surface totale de l'Alsace : 828 000 ha). Depuis 1982, les surfaces urbanisées ont augmenté de 25 %. Si on compare cette valeur au pourcentage actuel de surfaces aménagées donnant lieu à la sauvegarde du patrimoine, on peut comprendre l'importance des désastres patrimoniaux associés au pic d'aménagement des années 60 et 70, où - pour des raisons pratiques et institutionnelles - les découvertes alors fortuites ne faisaient pas l'objet de suivi scientifique.

On observe cependant des disparités entre les deux départements alsaciens. On a consommé plus de terrain dans le Bas-Rhin (9614 ha), avec un taux d'évolution des zones urbanisées assez fort (31 %) qui s'exprime majoritairement par de l'extension urbaine (56%). La consommation foncière est supérieure à 30 %, dans le pays de Bruche Mossi, dans la région de Strasbourg et dans le pays d'Alsace du Nord où elle est la plus importante. 150 ha par an ont été aménagés dans la seule région de Strasbourg et le pays d'Alsace du Nord, soit 40 % de la consommation foncière alsacienne entre 1982 et 2000.

Dans le pays de Mulhouse et du Vignoble Grand Ballon cette consommation n'est que de 14 à 16 %. Dans le Haut-Rhin, seulement 4734 ha ont été aménagés, avec un taux d'évolution plus faible (18%) qui s'exprime majoritairement par la densification urbaine (56%). Dans le Haut-Rhin, le pays de Colmar est la seule région où plus de 70 ha de terrains ont été bâtis. Ce rythme soutenu est associé à l'extension urbaine significative qui se fait généralement au détriment de l'activité agricole.

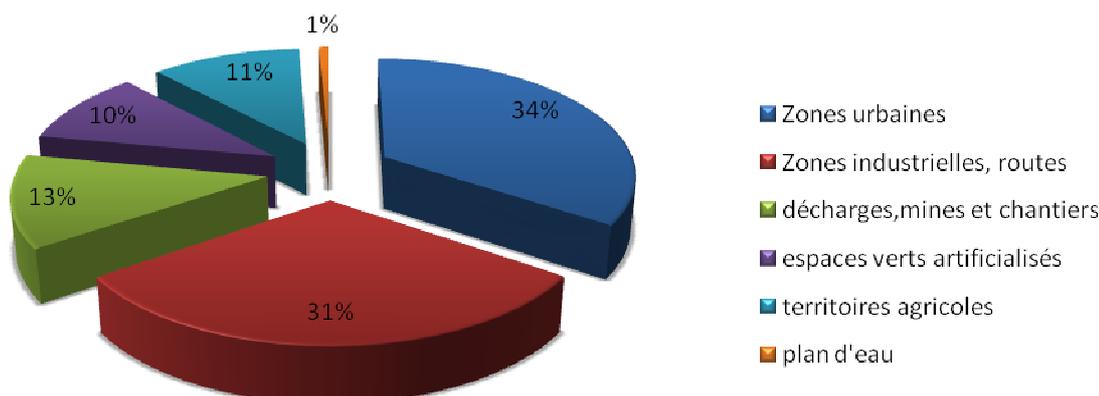


Figure 32 : Modification de l'occupation des sols entre 1990 et 2000 en Alsace (données CorineLandCover)

Depuis 1962, l'aménagement des extensions urbaines significatives est de 25 000 ha soit une augmentation de 60% de la tache urbaine (fig. 32). Le rythme de croissance de la tache urbaine par extension est plus fort dans le Bas-Rhin (64%) que dans le Haut-Rhin (56%), et majoritairement axé autour des trois grandes villes alsaciennes et le long des axes routiers. Elle était encore comparable entre 1962 et 1982 pour les deux départements.

Entre 1962 et 2000, 72% de la consommation foncière sont destinés à l'habitat (fig. 33). D'abord de $\frac{3}{4}$, son pourcentage diminue au profit des zones d'activité - deux tiers après 1982 - même si l'habitat reste majoritaire dans les extensions urbaines significatives. Par contre, les zones dédiées à l'activité au sein de la tache urbaine doublent entre 1962 et 2000. Le rythme de croissance de ces surfaces est de 35 % dans les taches urbaines alors qu'en globalité il n'est que de 14 %. Au final, 37 % de la surface sont dédiés à l'activité, auxquels il faut ajouter les axes routiers.

L'augmentation de la tache urbaine est beaucoup plus forte dans les années 70 (43 %) et régresse fortement après (14%). Elle représente ainsi 17 000 hectares entre 1962 et 1982. Après 1982, elle ne représente plus que 30 % de la consommation foncière, soit 7500 ha (fig. 34). Seul Strasbourg continue à consommer autant d'espaces avant qu'après 1982.

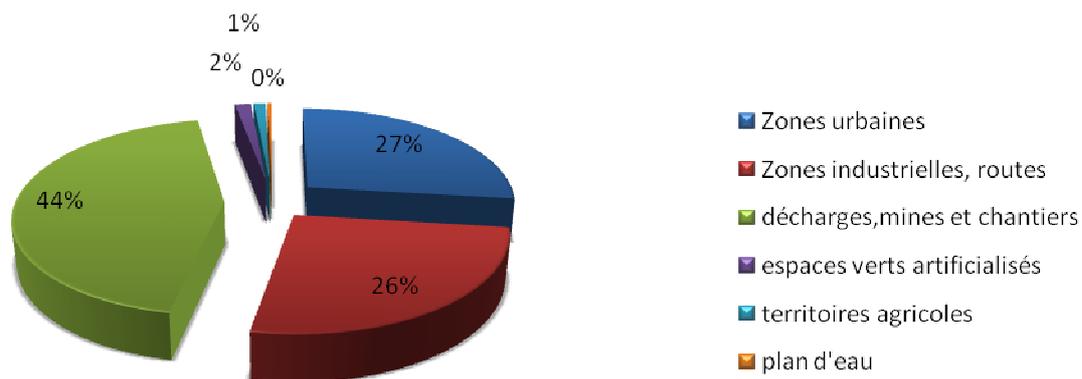


Figure 33 : Modification de l'occupation des sols entre 2000 et 2006 en Alsace données (données CorineLandCover)

2.3.1 Les grands projets d'aménagements

L'Alsace a été l'objet de plusieurs aménagements de grande envergure au cours des 30 dernières années. La création de l'A35 a permis de repérer par exemple des enclos funéraires notamment ceux de Sainte-Croix-en-Plaine découvert en prospection à l'occasion d'une étude d'impact (Plouin 1988).

Plus récemment, la création de la Ligne à Grande Vitesse Est-Européenne 2^{ème} phase, dans le nord de l'Alsace, a fait l'objet d'une prescription archéologique, avec un diagnostic (taux d'ouverture : 10 %) et de nombreuses fouilles réparties entre la frontière Alsace-Moselle (Mischler 2010) et la périphérie de Strasbourg (Croutsch 2011). Alors que la première phase du tracé LGV-est est longue de 300 km, la deuxième phase s'étend sur 106 km entre Baudrecourt-en-Moselle et Vendenheim dans le Bas-Rhin dont 35 km sur le tronçon alsacien. La géophysique a été mise en œuvre sur plusieurs opérations du tracé (Ingenheim, Duntzenheim 1, Duntzenheim 2, Steinbourg) pour le diagnostic des zones de dépôts et pour des études hors-emprise.

Un autre projet linéaire de grande ampleur, la LGV Rhin-Rhône, phase II, qui relie Dijon à Mulhouse a été entamé dans sa partie alsacienne (190 km entre Belfort et Besançon et 50 km entre Belfort et Mulhouse). Les travaux annoncés pour 2014 ont été précédés par une phase de diagnostic entre 2010 et 2011. Peu de sites ont été reconnus sur l'ensemble du tracé. Celui-ci traverse plusieurs zones boisées, où seul un layon central a été aménagé permettant l'implantation d'une tranchée longue continue et de tranchées parallèles en cas de découverte de vestiges (soit une ouverture à environ 2 %). Ce procédé, qui résulte de la contrainte naturelle que constitue la forêt et de choix politiques relatifs à la prescription, a entraîné un très faible échantillonnage sur l'ensemble du tracé sous couvert forestier. Les zones agricoles ont par contre pu être diagnostiquées de manière traditionnelle à hauteur de 10 % d'ouverture. Plusieurs zones de guerres ont également été traversées, dont plusieurs présentaient

encore de fortes concentrations d'engins de guerre dont certains non explosés (UXO). La géophysique n'a pas été mise en œuvre sur ce projet, contrairement au LiDAR, notamment en forêt pour des questions d'accessibilité au terrain, et sur les zones de guerre pour des questions de perturbations magnétiques.

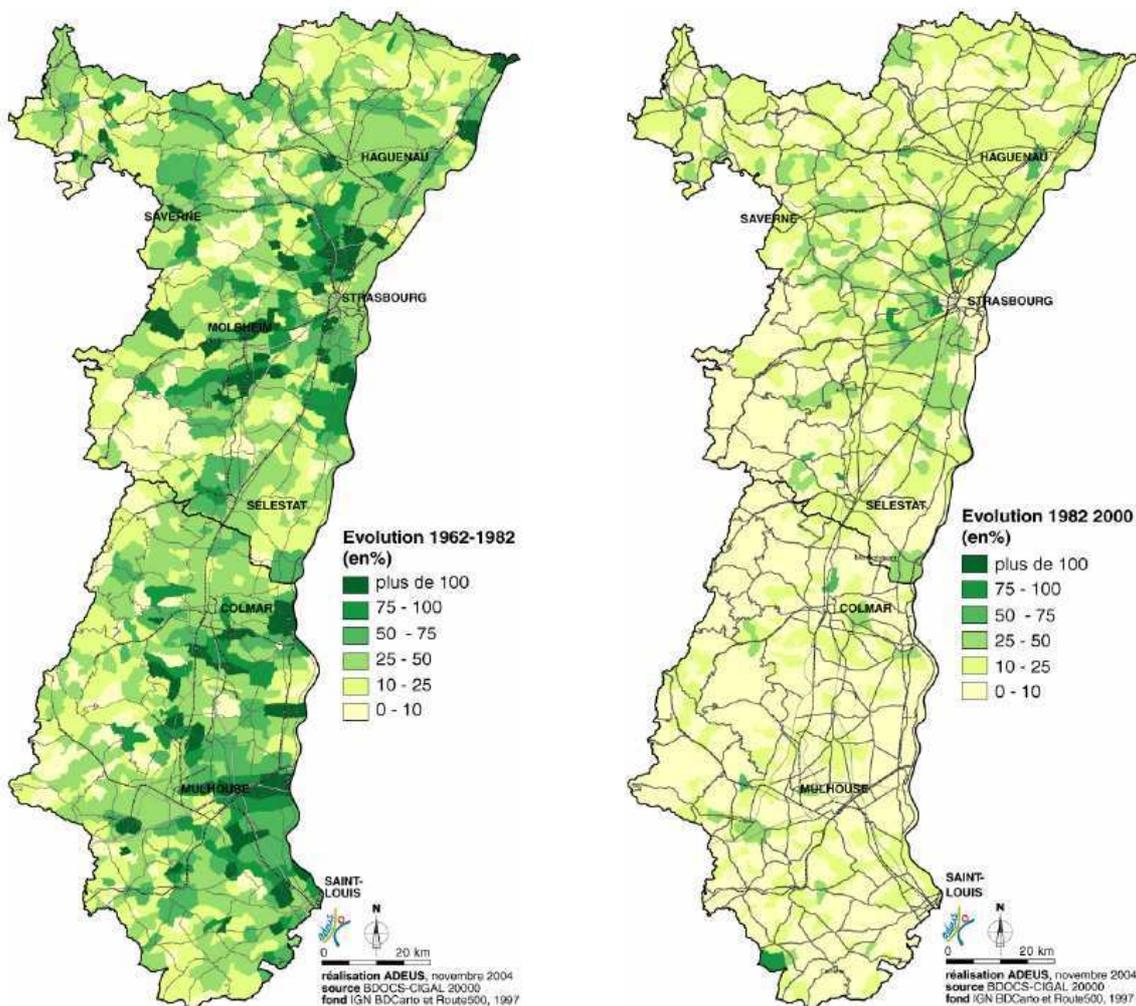


Figure 34 : Evolution des extensions urbaines significatives (en %) sur la région Alsace (DREAL 2007)

D'autres projets d'aménagements sont prévus dans l'avenir comme le grand contournement Ouest (GCO) de Strasbourg. Cette bande de 40 km de long traversera les zones lössiques du Kochersberg qui présentent un fort potentiel archéologique. Les problématiques qu'ils mettent en jeu en termes d'archéologie seront proches de celle des grands projets d'aménagements linéaires.

Sur d'autres projets, comme à Rouffach, seule une bande étroite a fait l'objet d'un diagnostic qui suit l'axe routier déjà existant, ou à Ensisheim, où le projet d'aménagement linéaire, très étroit, longe un chemin (limitant alors la largeur du diagnostic à une quarantaine de mètres).

2.3.2 L'occupation des sols

Le Bas-Rhin (479819 ha) a une surface agricole utile (SAU) de 197 111 ha et 174400 ha de forêt (36 % du territoire) contre 136 245 ha dans le Haut-Rhin (348 100 ha) avec 178 900 ha de forêt (51 % du territoire). Cette forêt (353 300 ha) représente 41% du territoire régionale et place la région Alsace au troisième rang des régions les plus boisées de France.

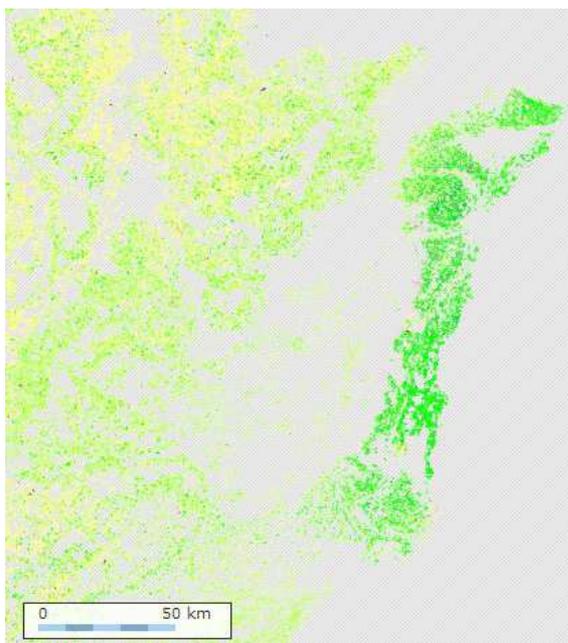


Figure 35 : Carte d'occupation des sols; on distingue en vert foncé les parcelles cultivées en maïs. La couleur verte associé à la monoculture du maïs dans la plaine dessine nettement les contours de l'Alsace (hors Alsace Bossue et Massif vosgiens) (source IGN)

La répartition des SAU sur le territoire alsacien n'est pas proportionnelle à la surface de chaque entité géographique.

SAU Bas-Rhin :

Ried	17 %
Plaine	38 %
Région sous-vosgienne	30 %
Alsace bossue	11 %
Montagne Vosgienne	4 %

SAU Haut-Rhin :

Montagne	12 %
Collines	10 %
Plaine	21 %
Hardt	15 %
Ried	3 %
Jura	5 %
Sundgau	34 %

Dans le Bas-Rhin, les régions les plus pauvres en SAU sont les montagnes vosgiennes, l'Alsace Bossue et le Ried. Les deux autres régions présentent une part plus importante de SAU, la plaine la part la plus importante.

Dans le Haut-Rhin la SAU se répartie différemment. Une faible part est située en montagne, région prédominé par les zones boisées. Les collines présentent une SAU plus restreinte alors que le Ried et le Jura se partagent moins de 10 % de la SAU. Enfin le Sundgau présente la plus grande surface agricole utile du territoire après la plaine de Haute Alsace.

L'agriculture alsacienne est dominée par la culture du maïs – 37,7 % de la SAU du Bas-Rhin et 42,6 % de la SAU du Haut-Rhin - alors que la culture du blé ne s'étend sur ces deux départements que sur 14,3 et 11,1 % de la SAU (fig. 35). Une part minime est réservée aux autres céréales, aux cultures d'oléagineux-protéagineux et aux cultures spéciales. La viticulture couvre 3,4 % de la SAU du Bas-Rhin et 6,3 % dans le Haut-Rhin soit 14 000 hectares sur l'ensemble de la région. Les zones de cultures fourragères et de prairies naturelles représentent 39,5 % de la SAU dans le Bas-Rhin et 34,7 % dans le Haut-Rhin.

Dans le Haut-Rhin la culture du maïs est concentrée dans la plaine, la Hardt et le Ried où elle s'étend sur une très forte part de la SAU. Dans le Sundgau, dont 30 % de la surface est recouverte par la forêt (chênes, frênes et hêtres), elle occupe la moitié de la SAU.

3 Sites du massif vosgien et de son piémont

3.1 Bernardvillé – Baumgarten -

Dans le cadre du projet d'aménagement de l'abbaye de Baumgarten à Bernardvillé, le SRA a prescrit un diagnostic sur 2000 m², dont 420 devraient faire l'objet d'une construction. L'accessibilité des terrains en prairies sur et autour de l'emprise, et l'étendue très limitée de l'emprise des sondages pouvant être réalisés ont motivé la réalisation d'une prospection. Elle a été effectuée au printemps 2009 et couvre une surface de 1,36 ha. Le diagnostic a, quant à lui, permis d'ouvrir 5,7 % de l'emprise total du projet par sondages systématiques (Reutenauer 2009).

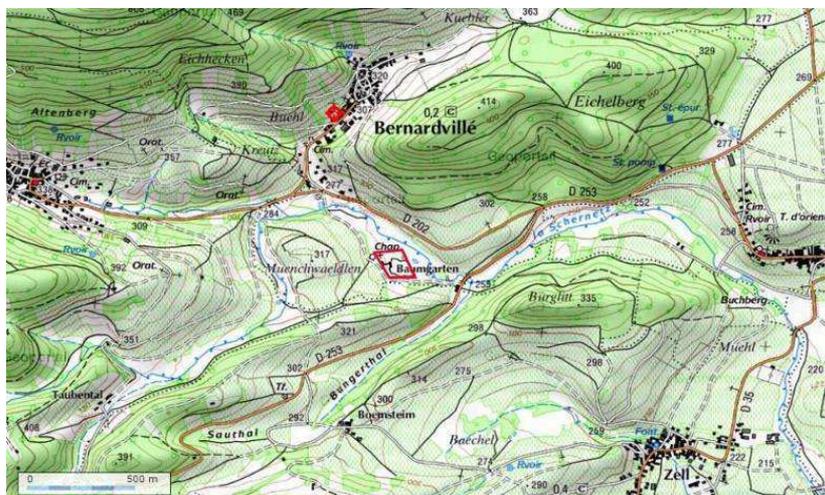


Figure 36 : Carte de localisation du site de Bernardvillé (source IGN)

3.1.1 Contexte géomorphologique



Figure 37 : Log stratigraphique qui met en évidence le niveau de démolition limoneux et le substrat argileux (cliché F. Reutenauer)

Le site est implanté au sud du village dans un petit vallon creusé par la Scheer (fig. 36), en limite des collines sous-vosgiennes. L'analyse des niveaux stratigraphiques profonds a pu se faire d'après les résultats de sondages géotechniques établis en amont de l'aménagement.

Les niveaux superficiels reposent sur des assises du Meisenbuckel, caractérisées par des dépôts volcano-détritiques. Ces niveaux d'arkoses fortement altérés, qui apparaissent entre 3 et 4 m, sont recouverts par des formations gravelo-sableuses qui correspondent à un état très avancé d'altération des niveaux sous-jacents. Ces derniers sont scellés par une couche argileuse de 2 m, qui apparaît entre 0.8 et 1.6 m de profondeur, produit du

colluvionnement des versants schisteux. Par-dessus prend place le niveau d'occupation médiévale, limono-argileux de 20 à 80 cm avec des inclusions de moellons de grès, de granite et des fragments de tuiles (fig. 37).

Un niveau de remblai limono-sableux contenant des éléments de terre cuite, de céramique moderne, des galets et des moellons, probable rehaussement de la terrasse après l'abandon du site, recouvre cette occupation.

3.1.2 Contexte archéologique

Aucune autre découverte archéologique que celle de l'abbaye de Baumgarten n'a été signalée dans ce secteur. Elle a été fondée en 1125, consacrée en 1133, et investie par les Cisterciens en 1148. Le cloître, les bâtiments conventuels et l'église ont été agrandis dès 1153. La Guerre des Paysans en 1525 a entraîné l'abandon du site. En 1548, les bâtiments servaient déjà de carrière pour la construction de l'enceinte de Benfeld.

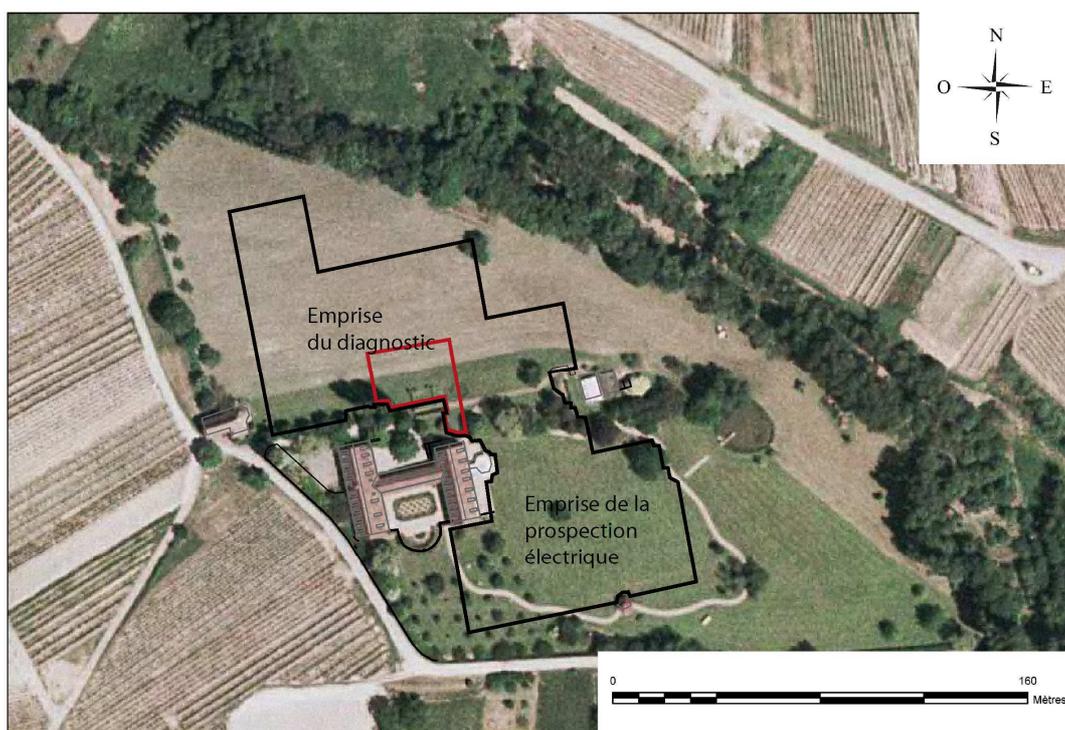


Figure 38 : Orthophoto de l'environnement du site et localisation de la prospection (source IGN)

Il ne subsiste de l'abbaye qu'une seule pièce de 16,5 m de long sur 8,75 m de large, édifée en style roman, au sein du bâtiment actuel (fig. 38). Le niveau de circulation y est 1 m plus bas que le niveau de sol actuel à l'extérieur. D'après la disposition du bâtiment actuel elle avait été identifiée comme la salle capitulaire du complexe abbatial. Les tranchées ont permis de repérer plusieurs murs de l'ancienne abbaye et une zone cimetériale à proximité.

La zone cimetériale, close par un mur en grès dont l'entrée a été dégagée et au-delà duquel aucun aménagement n'a été découvert, a été mise au jour à l'ouest de l'église abbatiale (fig. 39). 14 sépultures identifiées selon deux modes d'inhumation : en linceul et en cercueil en bois. Le sédiment hydromorphe a permis une bonne conservation de ces vestiges (fig.40). Ce secteur est séparé du reste des découvertes par un mur et au-delà duquel aucun aménagement n'a été reconnu. La détermination chronologique n'a pas permis d'attribuer ces différents éléments au début ou à la fin de l'occupation. Aux abords des murs du complexe abbatiale, des niveaux de démolition ont été observés, dont certains au-dessus des niveaux d'apparition des sépultures. Enfin, à 2 m de profondeur environ, des fossés larges de 0,45 à 0,65 m semblent antérieurs au cimetière.

Le mur de clôture à 0,4 m de profondeur, est large de 0,72 m et conservé sur 1,2 m de hauteur. Il est constitué de moellons de grès et d'un blocage en blocs de grès de petit module. Les tranchées de fondations apparaissent à 1,3 m de profondeur. Le mur 2, orienté est-ouest, à 0,5 m de profondeur, large de 0,7 m est conservé sur 1 m de hauteur.

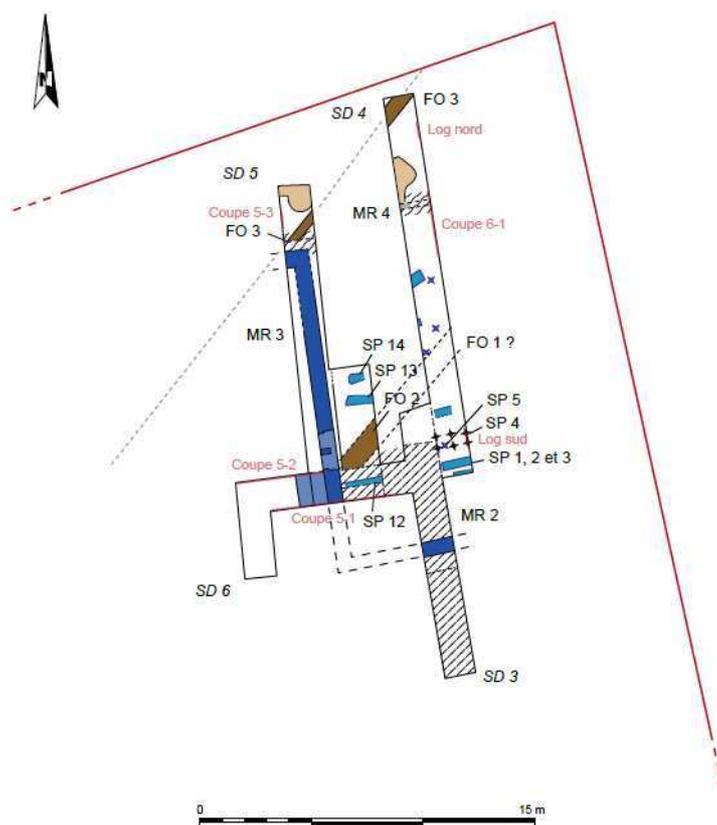


Figure 39 : Plan archéologiques des découvertes effectuées lors de l'excavation par tranchées dans le quart nord-ouest de l'emprise du diagnostic (Reutenauer 2009)

Certains vestiges n'ont pas pu être datés, comme le mur 1, maçonné, large de 1,1 m et qui apparaît à 1,4 m de profondeur. La présence de céramique et l'aménagement d'une tranchée trahissent la récupération tardive de ses éléments de construction. Une fosse de 1 m de profondeur est comblée par des blocs de grès. Un autre aménagement à la même profondeur a pu être daté du 17^{ème} siècle. A cette période, le site est alors utilisé comme carrière.

Une canalisation large de 0,8 m a été mise au jour entre 1,1 et 1,65 m de profondeur, alors qu'aucun creusement n'a été observé dans les niveaux superficiels. Il pourrait s'agir d'un élément qui se trouvait en surface, sur le niveau argileux, et qui a ensuite été recouvert par les niveaux limoneux archéologiques.



Figure 40 : A gauche : sépultures dans la zone cimetériale présentant un comblement argileux dans un substrat argileux, à droite le mur de clôture de la zone cimetériale (clichés F. Reutenauer)

3.1.3 Résultats obtenus en prospection électrique

Sur la base de cette description nous avons abordé l'interprétation de la prospection géophysique. Les mesures ont été acquises avec un dispositif pôle-pôle (certains auteurs Anglo-Saxons appellent cette configuration 'twin probes') et trois écartements d'électrodes suivant la configuration habituellement utilisée pour le RM15, soit 0,5, 1 et 1,5 m. Les valeurs de résistivité diminuent pour les plus grands écartements, ce qui révèle une augmentation de la teneur en argile avec la profondeur. Pour l'écartement le plus important, on obtient 15 ohm.m après filtrage des valeurs aberrantes, soit une résistivité correspondante à un sol argileux développé sur les dépôts des bas de versant. Dans les sondages, les niveaux purement argileux ont été observés à 1,5 m de profondeur, limite de la profondeur d'investigation pour l'écartement à 1,5 m en configuration pôle-pôle (fig.43).

Le niveau d'occupation archéologique limono-sableux repéré dans les tranchées de sondage ne semble pas uniformément réparti sur l'ensemble du site. Au sud et au nord, les concentrations de vestiges sont en effet les plus faibles. La résistivité augmente brutalement en bas de talus, au nord. L'origine de cette forte augmentation est à mettre en relation avec la proximité de la Schneertz qui a charrié des éléments grossiers ainsi que des sables arrachés aux arkoses et aux grès en amont. Plusieurs aménagements récents, comme un chemin gravillonné, ont entraîné des perturbations en surface et induit de mauvais contacts entre les électrodes et le sol, affectant ainsi les données pour les trois écartements d'électrodes.

Sur le reste du terrain, les cartes de résistivité électrique apparente présentent de nombreuses anomalies orientées pour la plupart nord-sud et est-ouest (fig. 44). Dans la continuité immédiate des

sondages, elles ont clairement révélé le plan d'une église. Au sud, certaines d'entre elles trahissent l'existence de bâtiments faisant probablement partie du cloître de l'ensemble abbatial, avec à l'extrémité sud un mur d'enceinte légèrement décalé par rapport à la limite actuelle. Au nord, les vestiges repérés lors du diagnostic laissent place à un ensemble plus diffus d'anomalies conductrices.

Le plan de l'église est apparu assez nettement pour qu'on puisse en déterminer les dimensions : une nef de 34 m de long sur 15 m de large et des petites chapelles de 3 m sur 4 accolées au mur oriental du transept. A l'intérieur, plusieurs anomalies résistantes ponctuelles divisent la nef en un vaisseau central de 6 m de large et deux bas-côtés de 4 m de large chacun. Seul le chœur, situé sous le chemin gravillonné actuel et sous une serre, n'a pu être cartographié.



Figure 41 : Vue du mur d'enceinte du cimetière avec en premier plan le niveau de démolition observé sur les cartes électriques (cliché F. Reutenauer)

Aux abords de l'église, l'augmentation de la résistivité avec un écartement d'électrodes de 1 m signale de probables niveaux de démolitions (fig. 41). La présence d'anomalies linéaires pour l'écartement à 50 cm indique que les murs sont encore en élévation au-dessus de ces niveaux. Ces anomalies linéaires persistent pour les écartements à 1 et 1,5 m, révélant une extension en profondeur des fondations. Cette association entre les anomalies résistantes locales et les anomalies linéaires peut être faite sur l'ensemble du site où les sondages mécaniques ont retrouvé une phase de démolition, datant de la période où le site a servi de carrière.

Au nord du diagnostic, les anomalies sont beaucoup moins denses : la plus marquée correspond à la canalisation encore utilisée (repérée par le biais des regards des canalisations). Le tracé du mur de clôture qui circonscrit la zone funéraire coïncide avec une anomalie linéaire et se prolonge vers la chapelle actuelle en bordure ouest de la zone prospectée. Au nord de la prospection, plusieurs anomalies de faible résistivité forment un ensemble diffus auquel il serait peu raisonnable d'attribuer

une fonction précise d'après les seuls résultats de la prospection. A la suite des observations sur le mur d'enceinte (situation périphérique au complexe abbatiale), ces éléments pourraient correspondre à des éléments périphériques moins massifs peut-être attribuables à des aménagements définissant un parcellaire.

Au Sud de l'église, et suivant les mêmes orientations nord-sud et est-ouest que celui des bâtiments actuels, se développe un ensemble d'anomalies essentiellement résistantes et délimitant plusieurs espaces. On distingue des anomalies locales de résistivité pouvant correspondre aux nappes de matériaux de démolition, à l'extrémité ouest du projet alors qu'au sud, les anomalies sont plus éparsees. Au vu de la situation de l'église, des connaissances historiques sur ce type de bâtiment et des vestiges de la salle « capitulaire », on peut interpréter ces traces comme celles du cloître dont le plan complet n'a pas pu être appréhendé par la cartographie de la résistivité. Malgré la bonne conservation des vestiges dans la partie ouest de l'église, certains vestiges ne sont apparus qu'à plus d'un mètre de profondeur. On pourrait très bien imaginer que les murs aient fait l'objet de récupérations plus importantes, entraînant une disparition des vestiges superficiels. Seul resterait le bruit dû aux tranchées de récupération et aux matériaux de démolition environnant les anciens bâtiments. Il semblerait que les bâtiments se développent plutôt à l'est qu'au sud, observation qui doit être nuancée par des variations dans la conservation des vestiges. Au sud de la prospection, une forte anomalie de résistivité révèle la présence d'un mur qui pourrait correspondre à l'enceinte.



Figure 42 : Fossé FO3, non détecté, présentant un comblement argileux dans un encaissant argileux (cliché F. Reutenauer)

Les fossés observés au cours du diagnostic, en profondeurs, et avec un comblement limono-argileux, n'ont pas été détectés (fig. 42), ce qui s'explique par un faible contraste entre eux et leur encaissant et leur faibles sections. La méthode électrique n'est pas adaptée à la détection de telles structures conductrices associées à un encaissant conducteur et à cette profondeur.

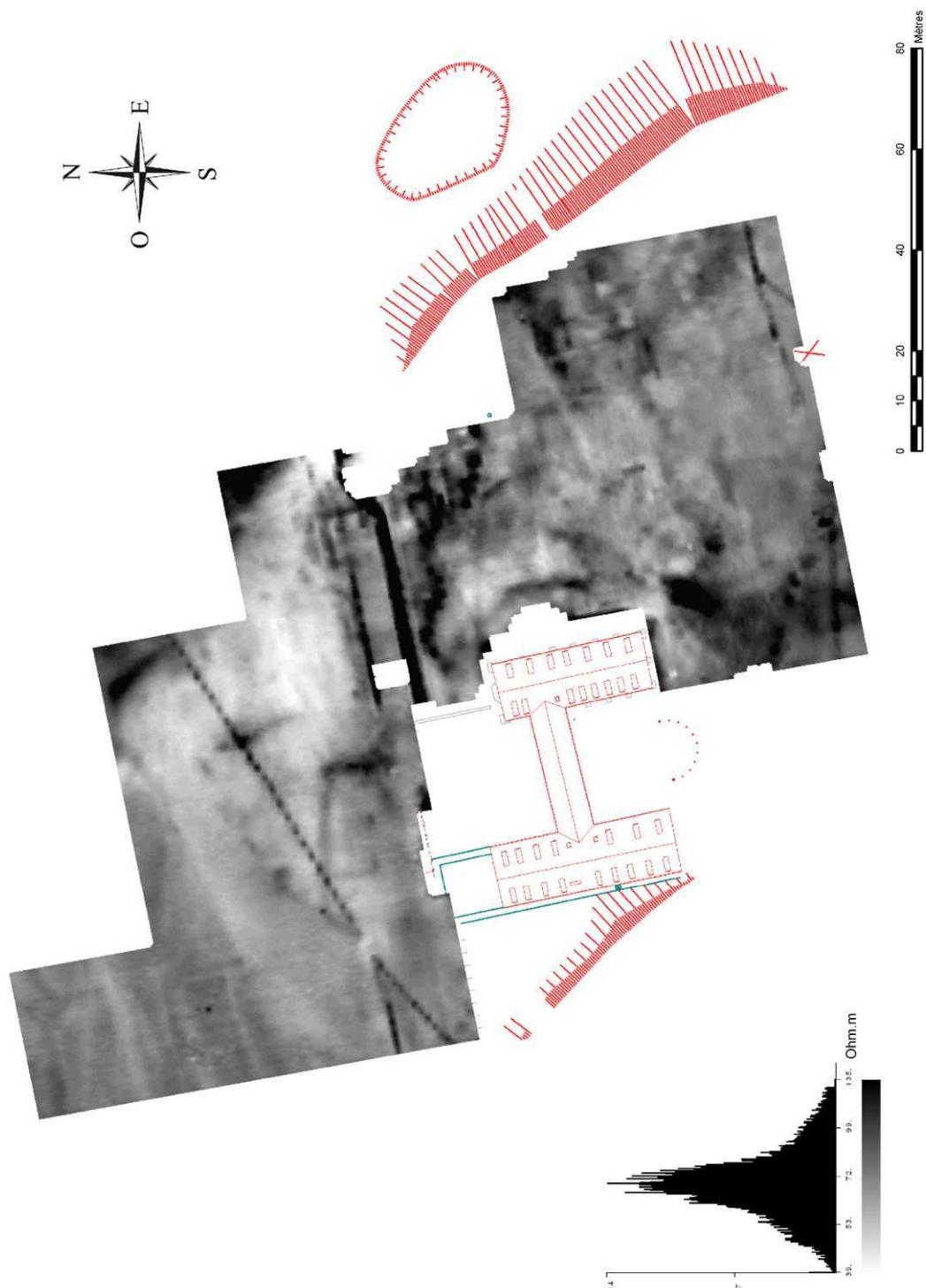


Figure 43 : Carte de résistivité électrique apparente avec un écartement inter-électrodes de 0.5 m en configuration pôle-pôle



Figure 44 : Interprétation des cartes de résistivités électriques : les anomalies dessinent très nettement le plan de l'église abbatiale et révèlent les indices du complexe au sud.

La corrélation entre les structures découvertes au cours du diagnostic et les résultats géophysiques ont permis de bien caractériser les parties superficielles des murs et les niveaux de démolitions beaucoup mieux que ne l'aurait permis chacun des deux outils pris isolément. Cette expérience a aussi confirmé les limites de la méthode pour la détection des structures excavées de trop faible contraste ou trop profondes (le mur 1 ou les fosses empierrées à 1 m de profondeur). La mise en perspective spatiale conduit aussi à envisager l'existence de vestiges isolés, comme les sépultures, bien que ces dernières ne soient pas détectables, le comblement de leurs fosses étant quasi identique au substrat dans lequel elles ont été creusées. Il aurait été très difficile sur une si petite surface de remettre en contexte les structures bâties découvertes par le seul biais du diagnostic, et l'interprétation des vestiges découverts ne pouvait se faire sans les données spatiales fournies par la géophysique.

3.2 Obernai – Hôpital Schulbach -

Une prospection magnétique a été engagée sur le diagnostic de l'hôpital Schulbach en hiver 2010 en limite nord de l'emprise du projet d'aménagement (fig. 45). En raison des perturbations de surface, dues à une forte pollution en objets métalliques et à la présence d'engins mécaniques dans cette partie du terrain, les résultats obtenus sur une très petite surface n'ont pas permis d'observer des anomalies pouvant correspondre à des structures archéologiques.

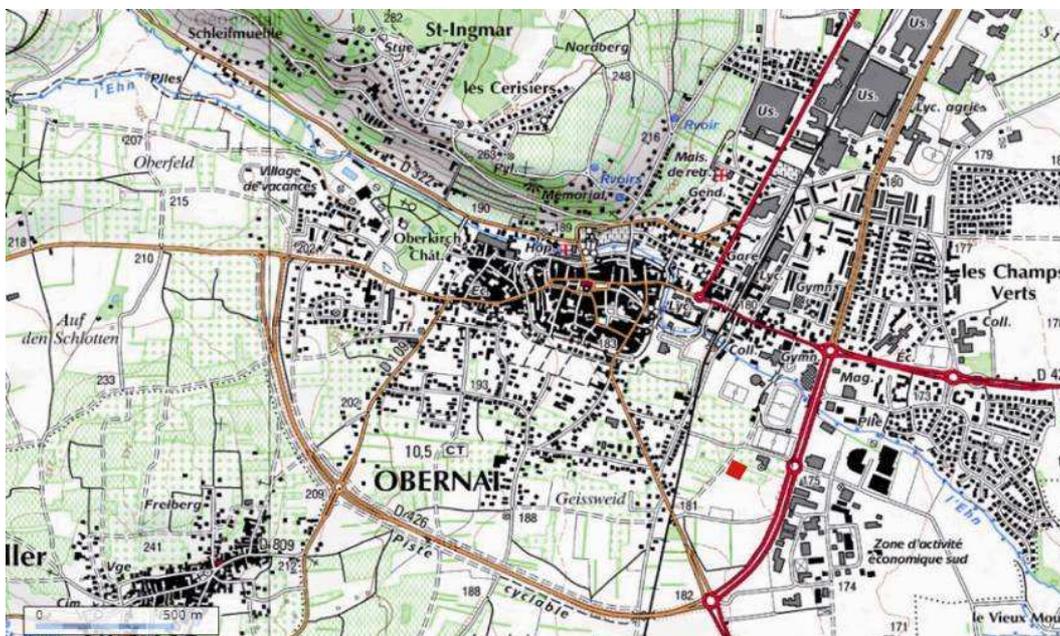


Figure 45 : Carte de localisation du site d'Obernai (source IGN)

Une nouvelle campagne de mesure a donc été menée immédiatement après le décapage à l'été 2011. Les mesures de susceptibilité magnétique ont été réalisées avec le MS2 de Bartington afin de distinguer d'éventuelles structures archéologiques.

3.2.1 Contexte archéologique

La fouille a été réalisée en juin 2011. Deux secteurs de 6000 m² et 1500 m² ont été décapés, mais seul le premier a fait l'objet de mesures de susceptibilité magnétique. Le décapage a révélé 200 structures. Plusieurs occupations semblent s'être succédées, du Néolithique (4500 AD) au Hallstatt (500 A.D.). L'état de fragmentation des tessons n'a pas permis d'attributions chronologiques précises, c'est pourquoi une grande partie des structures sont indifféremment datées de la protohistoire ou du néolithique. Les vestiges retrouvés sont essentiellement des fosses et des silos enterrés, réutilisés en dépotoirs. Dans un des silos a été découvert le squelette d'une enfant associé à des restes d'animaux. La majorité des structures présentait des comblements charbonneux, voire rubéfiés. Sur la deuxième zone, les structures très riches en carporesses sont datées de l'âge du Bronze (Ferrier 2010).

3.2.2 Contexte géomorphologique



Figure 46 : Log stratigraphique du recouvrement lœssique sur le site d'Obernai (cliché A. Ferrier)

Le site est implanté sur une terrasse de lœss pléistocène, en contact avec des dépôts alluvionnaires.

Le substrat lœssique jaunâtre compact présente une porosité moyenne. Il est recouvert par 60 cm de terre végétale et de lœss altéré ou lehm remanié avec quelques poupees de lœss (fig. 46). Le niveau de lehm présente une très forte activité biologique avec des racines et des traces de bioturbations. Les vestiges sont creusés dans ces niveaux lœssiques. Une partie du recouvrement a été perturbée par les labours récents. Le recouvrement des structures varie entre 0,3 et 0,9 m. Dans la zone alluvionnaire, la matrice sableuse peut contenir des galets pouvant atteindre 25 cm de diamètre. Ce niveau est recouvert par les niveaux de lehm brun et ne présente pas de vestiges.

3.2.3 Résultats géophysiques

Les mesures sur surface décapée ont été réalisées avec un maillage de 1 m entre chaque point de mesure (fig. 50). Les petites structures considérées comme ponctuelles par rapport au maillage utilisé ont été évitées. Les valeurs fausses (instrumentales) repérées directement sur le terrain ont fait l'objet d'une seconde mesure de validation.

Les variations locales ont pour origine les structures observées lors du décapage et de la fouille. Aucune structure supplémentaire n'a pu être repérée par ce biais. Il n'y a donc a priori pas de problème de lisibilité sur ce terrain entre encaissant lœssique et structures. On a observé de fortes valeurs de susceptibilité qui peuvent atteindre $170 \cdot 10^{-5}$ u.S.I., cohérentes par rapport aux types de structures rencontrées (fosses avec matériel rubéfié, etc.).

La prospection présente dans sa partie nord des valeurs très faibles de 10 à $20 \cdot 10^{-5}$ u.S.I. et au sud des valeurs plus importantes de 20 à $40 \cdot 10^{-5}$ u.S.I. On peut d'ores-et-déjà distinguer la partie sud-est où les variations sont dues à la différence de substrat, des alluvions sableuses avec des galets (qui peuvent être d'assez grand module) se substituent au lœss. Les variations locales observées dans cette zone où aucune structure archéologique n'a été découverte correspondent aux variations de susceptibilité d'aimantations des différentes roches.

Au nord, de faibles valeurs de susceptibilité magnétique se distinguent d'une susceptibilité magnétique générale assez élevée. Ces zones correspondent à des sondages profonds. Ces valeurs s'expliquent par la diminution de la susceptibilité avec la profondeur (Le Borgne 1955) habituelle dans les sédiments en particulier lœssiques. Ceux-ci, en effet, présentent une bonne capacité de formation de grains magnétiques en surface, grâce à une importante porosité utile ainsi qu'une importante fraction argileuse. Les variations de susceptibilité mesurées sur des surfaces décapées sont donc étroitement liées à la profondeur du décapage.

Cependant, la différence de profondeur du niveau de décapage n'explique pas à elle seule les différences de susceptibilité entre les parties nord et sud du site (fig. 47), Les niveaux de susceptibilité magnétique les plus élevés étant observés à l'est alors qu'il s'agit des niveaux les plus bas. En surface, aucun pendage n'a été observé, et le niveau de décapage est homogène dans le sens est-ouest.

Quelques îlots surélevés par rapport au niveau de décapage général sont corrélés à des valeurs de susceptibilité magnétique sensiblement plus fortes (fig. 48). Ils révèlent les limites de l'approche de ce type de terrain. On décape, les niveaux de recouvrement jusqu'à faire apparaître des contrastes visuels entre le comblement de la structure et le substrat (fig. 49). Sur ce décapage, ces contrastes ne sont apparus qu'à une profondeur de 50 cm environ lorsque les lœss altérés superficiels ne présentaient plus la couleur brune qu'ils ont en surface, alors que la structure elle-même a très vraisemblablement déjà rencontrée plus haut. Certaines structures rubéfiées avec la présence de charbon et d'éléments en terre cuite ont cependant pu être observées dans les niveaux plus proches de la surface.

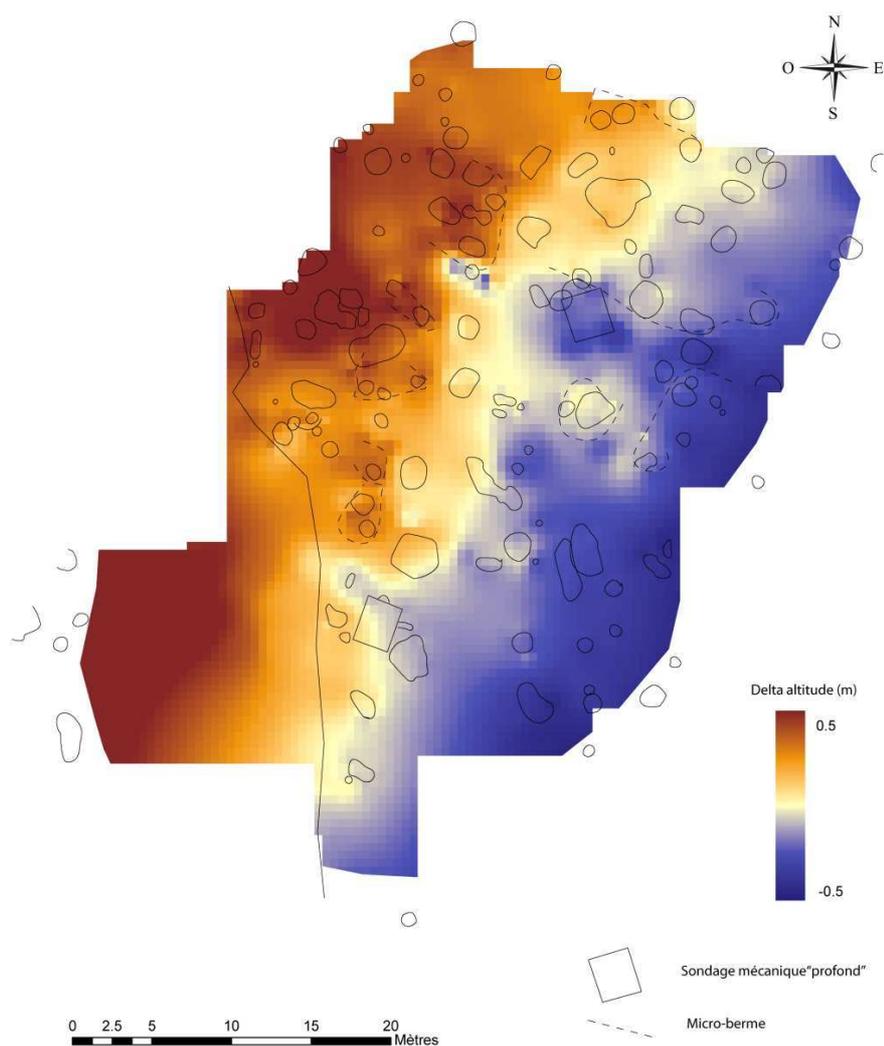


Figure 47 : Carte topographique de la surface de décapage. A l'Ouest la surface est légèrement plus élevée, indépendamment des structures découvertes. (fond A. Ferrier)



Figure 48 : Vue des bermes laissées sur le terrain et qui révèlent des variations dans la profondeur du niveau de décapage (cliché A. Ferrier)

Cette observation remet en question la technique du décapage sur des niveaux archéologiques dépourvus de matériel significatif. Aucun phénomène physique n'ayant entraîné la formation d'un comblement archéologique visuellement différenciable, les structures ne pouvaient être détectées dans les niveaux superficiels. D'une manière générale il serait alors impossible d'estimer visuellement le niveau de conservation des structures archéologiques. La cartographie des variations de la susceptibilité magnétique à chaque profondeur permettrait dans ce cas la mise en évidence de ces niveaux.



Figure 49 : Vue en plan d'une fosse présentant des contrastes assez nets entre le substrat lœssique claire et le comblement plus sombre de la structure (cliché A. Ferrier)

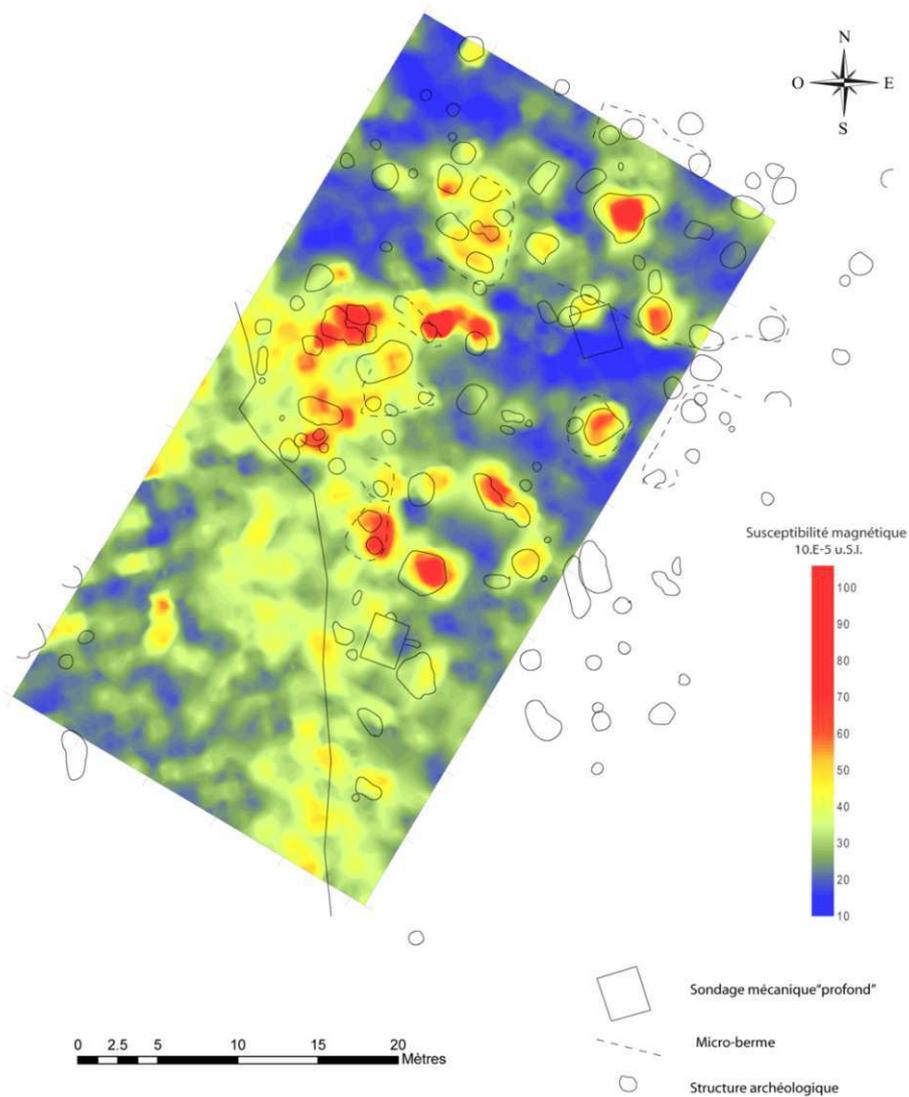


Figure 50 : Carte de susceptibilité magnétique apparente mesurée avec le MS2 (fond A. Ferrier)



Figure 51 : Vue générale de la surface décapée où se dessinent nettement les structures archéologiques (cliché A. Ferrier)

Les valeurs de susceptibilité magnétique qui dépendent fortement de la profondeur ne peuvent être le seul moyen d'appréhender ces structures archéologiques. S'il peut être très difficile de différencier les variations de susceptibilité magnétique dues à des phénomènes géologique ou pédologique de celles dues à des niveaux archéologiques (Hulin à paraître), il est clair sur ce site que seul le 'fond' de structures en creux a pu être identifié par la géophysique et qu'il n'a pas été possible de détecter de plan ou des niveaux d'occupation (fig. 52), de circulation, de parcage, etc. Une autre approche, associant une cartographie de la susceptibilité magnétique impliquerait de fortes contraintes sur les méthodes de décapage. La double approche mise en œuvre sur ce site a permis de mieux identifier les difficultés de l'interprétation des mesures de susceptibilité magnétique sur les surfaces décapées, en particulier dans les sols développés sur un substrat loessique.



Figure 52 : Vue en coupe d'une structure fouillée (cliché A. Ferrier)

4 Les sites sur terrasses lœssiques et collines calcaires

4.1 Duntzenheim – Sonnenrain -

Dans le cadre de la création de la LGV-Est Européenne 2^{ème} phase, la phase de diagnostic a mis au jour un habitat du Premier Moyen-âge ainsi qu'une villa déjà connue par photographies aériennes, et dont seule une partie est touchée par le projet linéaire, raison pour laquelle une prospection a été réalisée.

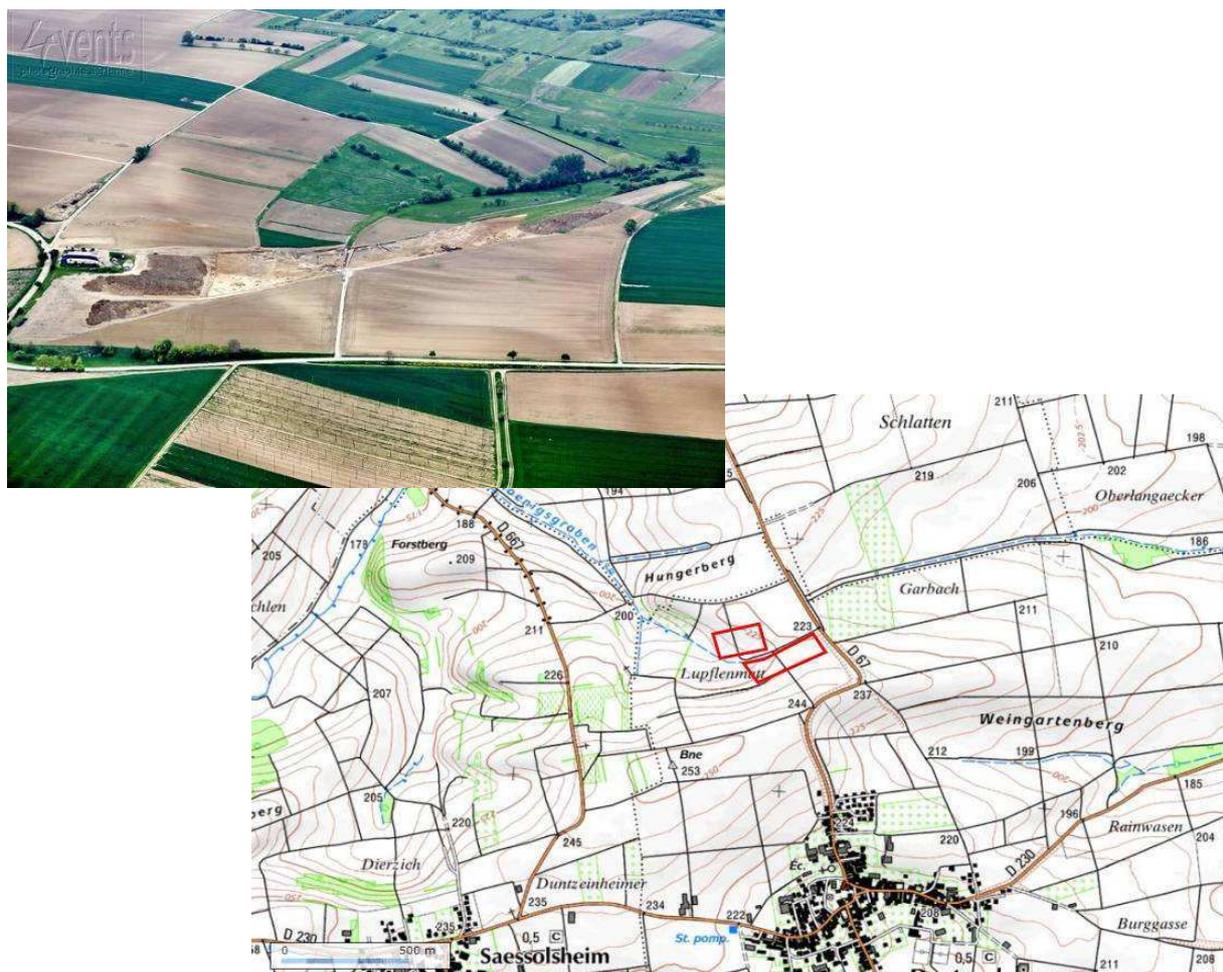


Figure 53 : Carte de localisation du site de Duntzenheim (source IGN) et vue générale du site (Données : Quatre vents)

Le site de Duntzenheim a fait l'objet de plusieurs prospections géophysiques entre le printemps 2009 et l'hiver 2010 : avant, pendant et après la fouille (mars à juin 2010). Les abords de la villa ont été prospectés avec la méthode électrique, qui a révélé son prolongement occidental et la présence de plusieurs bâtiments annexes. Sur cette partie du site, une prospection magnétique a apporté de nombreuses informations complémentaires aux données électriques, même si les murs de la villa n'y ont pas été directement observés. Sur le versant méridional, les prospections magnétiques ont

révélé l'extension du site alto-médiéval à l'est et à l'ouest, alors que la partie sud, diagnostiquée en 2007, se trouvait sous les déblais (Schneikert 2007). Durant la fouille, des mesures ont été réalisées pour tenter de déterminer le nombre de structures excavées potentielles sur la partie sud.

4.1.1 Contexte géomorphologique

Le site est localisé sur des versants de collines calcaires présentant des pentages importants (fig. 53). Les deux flancs nord-ouest et sud-est forment un talweg orienté nord-sud, traversé par un petit ruisseau toujours actif (Reutenauer et Bolly à paraître).

Sur le flanc nord, les niveaux de lœss érodés laissent apparaître les formations marno-calcaires. Sur le flanc sud, les lœss sont recouverts par un niveau de colluvions. La forte altération et le remaniement de ces sols lœssiques ont favorisé la formation d'un important dépôt de colluvions argileuses qui ont imperméabilisé le fond de la cuvette (fig. 54). Elle est de fait, propice à un bon enregistrement sédimentaire et renseigne les dynamiques sédimentaires du site : phases d'érosions et de colluvionnements des deux versants.



Figure 54 : Vue aérienne de la fouille archéologique : on peut y observer au sud et au nord les lœss alors qu'au milieu se concentrent les niveaux argileux des colluvionnements (clichés Quatre Vents)

On dénombre six phases sédimentaires. A la base, une série lœssique compacte et homogène avec des traces d'oxydo-réduction forme le substrat géologique. Elle est recouverte par un niveau remanié compact avec des tâches d'oxydo-réduction, dans lequel on observe les premières traces d'occupations. Une importante part de la fraction limoneuse révèle alors une dynamique de colluvionnement intense. Des dépôts limoneux fins, noirs, argileux et hétérogènes qui paraissent riches en matières organiques mettent fin à cette première phase de colluvionnement. Ces dépôts, moins remaniés, contiennent du matériel datant et sont le produit d'une certaine stabilité des versants. Au-dessus, un niveau de limon sableux compact et particulière avec une importante fraction grossière

trahit à nouveau une dynamique de colluvionnement plus active. Une couche de limons plus fins vient sceller ces niveaux. Elle présente un aspect compact et hétérogène avec une fraction grossière plus fine, produit d'un environnement plus stable du 8^{ème} au 12^{ème} siècle. Enfin, des colluvionnements limono-sableux viennent recouvrir cette série avec la reprise d'une dynamique de colluvionnement active après le 12^{ème} siècle.



Figure 55 : Photographie aérienne du site réalisée lors de l'étude d'impact sur le tracé de la LGV-Est (cliché R. Goguey)

Le talweg est de fait une zone de rejet des sédiments transportés sur les deux versants, mais aussi une zone humide qui a entraîné la transformation des oxydes. L'accumulation sédimentaire et l'évolution pédogénétique de cette zone dure probablement jusqu'au 7^{ème} siècle. Au cours du 10^{ème} siècle, l'habitat se rapproche du talweg suite à un assèchement naturel favorisé par un système de fossés de drainage.

4.1.2 Contexte archéologique

L'occupation antique, en pente douce, se concentre sur le versant ouest, alors que le village médiéval est adossé au versant opposé qui présente un fort dénivelé.

L'occupation la plus ancienne s'échelonne de la seconde moitié du 1^{er} siècle au milieu du 4^{ème}. La fouille a exhumé les fondations de la *pars urbana* d'une importante *villa*, constituées de moellons calcaires qui comblent des fossés creusés dans l'argile, les murs n'ayant pas été conservés (fig. 55). Autour d'un bâtiment central de 100 m de long sur 45 m de large se développent les aménagements de la *pars rustica*, avec différents bâtiments à vocations agricoles et domestiques : un grenier à grains, deux puits ainsi que des foyers domestiques. Sur le versant est, une occupation médiévale, dont seule une partie a pu être dégagée et fouillée, est occupé du 7^{ème} au 14^{ème} siècle. Il est coupé par un chemin doublé d'un fossé perpendiculaire à la pente, séparant le bas du vallon du haut de versant. Plusieurs

unités d'habitations, probablement délimitées par des clôtures, s'organisent autour de cette voirie. Chacune est constituée d'un bâtiment sur poteaux de bois lié à des fosses et d'un foyer à usage domestique. Sur la partie nord-est, un secteur artisanal comprend des fonds de cabanes de 10 m² environ, également sur poteaux de bois, ainsi que deux fours. Le rare matériel qui y a été découvert se fait l'écho d'une activité de tissage et de filage. Ce site d'habitat, occupé durant une longue période, permet d'appréhender l'évolution de l'organisation d'une structure villageoise durant le Moyen-âge (Reutenauer 2012).

4.1.3 Résultats géophysiques

4.1.3.1 Mesures sur surface décapée

Trois types de prospections ont été mis en œuvre sur la surface décapée : des mesures de champ magnétique, dans le but d'estimer le potentiel des structures existantes sous le premier niveau de décapage ; des mesures de susceptibilité magnétique pour cartographier des niveaux anthropisés peu lisibles ; des mesures de résistivité électrique afin de repérer d'éventuels empièvements plus profonds que le premier niveau de décapage, mais qui n'ont pas pu être exploitées. En effet l'assèchement de la surface décapée et la présence de nombreuses bermes sur le terrain ont entraîné de très mauvais contacts, modifiant la distribution de courants dans le sol, difficilement modélisables et donc malaisés à traiter.



Figure 56 : Vue générale de la surface décapée sur le site médiéval. On y observe les nombreuses bermes jalonnant le terrain (cliché F. Reutenauer)

4.1.3.1.1 Mesures d'aimantation magnétique

La carte magnétique présente de nombreuses anomalies, en relation avec des structures pour la plupart retrouvées en fouille. Aucune autre structure isolée de petit volume, de types trou de poteau, n'a été détectée. On remarque le prolongement vers l'ouest du fossé A, avec un niveau de bruit très faible du à la réalisation de mesures sur une surface décapée. Quelques éléments métalliques (très fortes anomalies) correspondent à d'anciennes houblonnières ou à des éléments en fer oubliés sur le terrain. Les variations de niveaux de décapages apparaissent nettement sur cette carte, en raison des variations de distances capteur-sol lors de l'acquisition des données (fig. 56). L'intérêt majeur de cette étude aura été de montrer à un instant de la fouille la richesse du terrain et d'en faire un argument pour l'élaboration d'une demande de fouilles complémentaires (fig. 57).

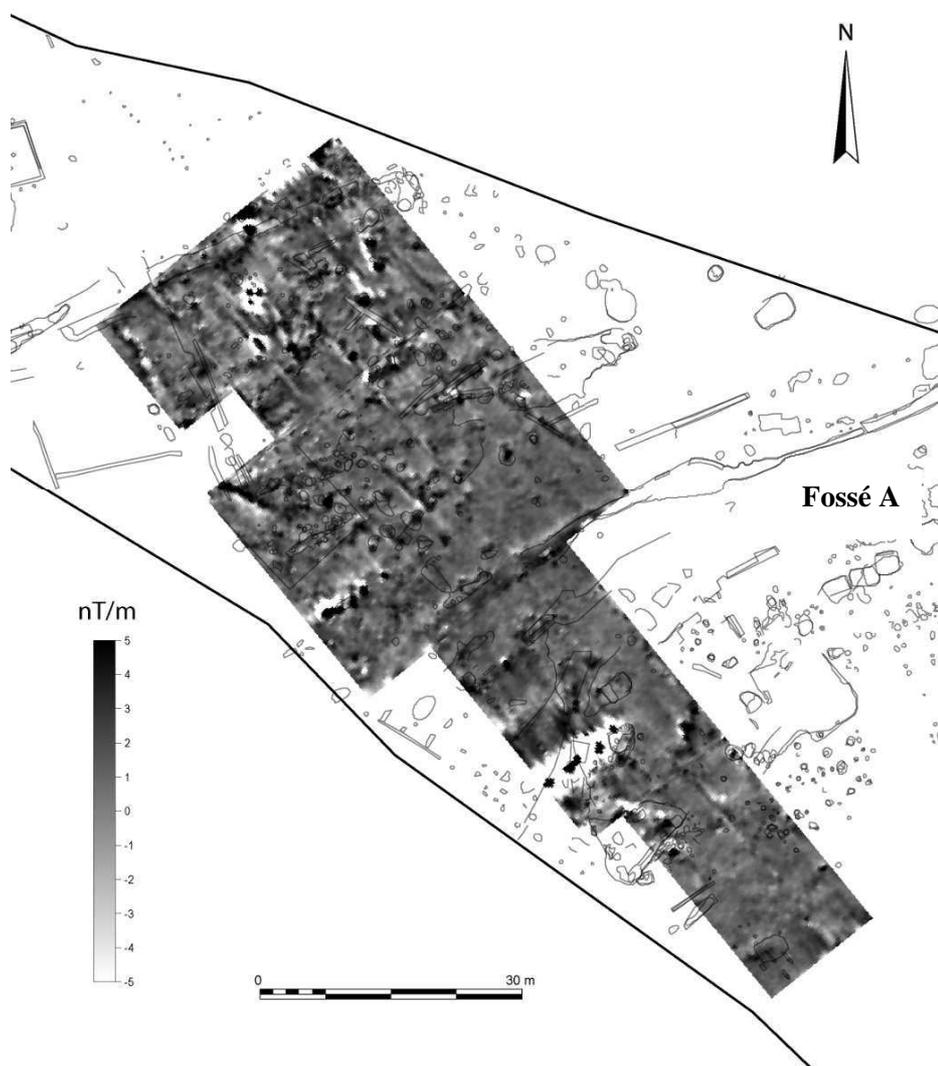


Figure 57 : Carte du pseudo-gradient vertical du champ magnétique terrestre sur le relevé des structures archéologiques : L'association de ces deux couches met en avant la redondance de l'information. On peut observer le prolongement du fossé A invisible sur le terrain. (fond F. Reutenauer)

4.1.3.1.2 Mesures de susceptibilité magnétique

Les mesures de susceptibilité magnétique avaient pour but de mettre en évidence des niveaux anthropisés ou/et des plans de bâtiments.

Malgré la forte déclivité du terrain, aucune relation n'a été observée entre la topographie et les valeurs de susceptibilité magnétique (Marmet 2000). L'explication tient surtout à la profondeur du décapage, inégale sur l'ensemble du terrain, et à un signal magnétique, du à l'occupation humaine et aux modifications du sol qu'elle a entraîné, bien plus important que les variations en lien avec la topographie (fig. 58). Au contraire, une très forte corrélation est observable entre l'organisation spatiale des structures et les anomalies de susceptibilité magnétique qui suivent les mêmes orientations (fig. 59).

Des zones très susceptibles ont été repérées, dont certaines au niveau des structures, ce qui s'explique par le comblement particulièrement magnétique de ces ensembles d'assez grandes dimensions ou par des niveaux peu étendus, sans doute des zones d'activités anthropiques. L'origine de ces anomalies bien délimitées par la géophysique est à rechercher par comparaison avec les résultats archéologiques environnants.

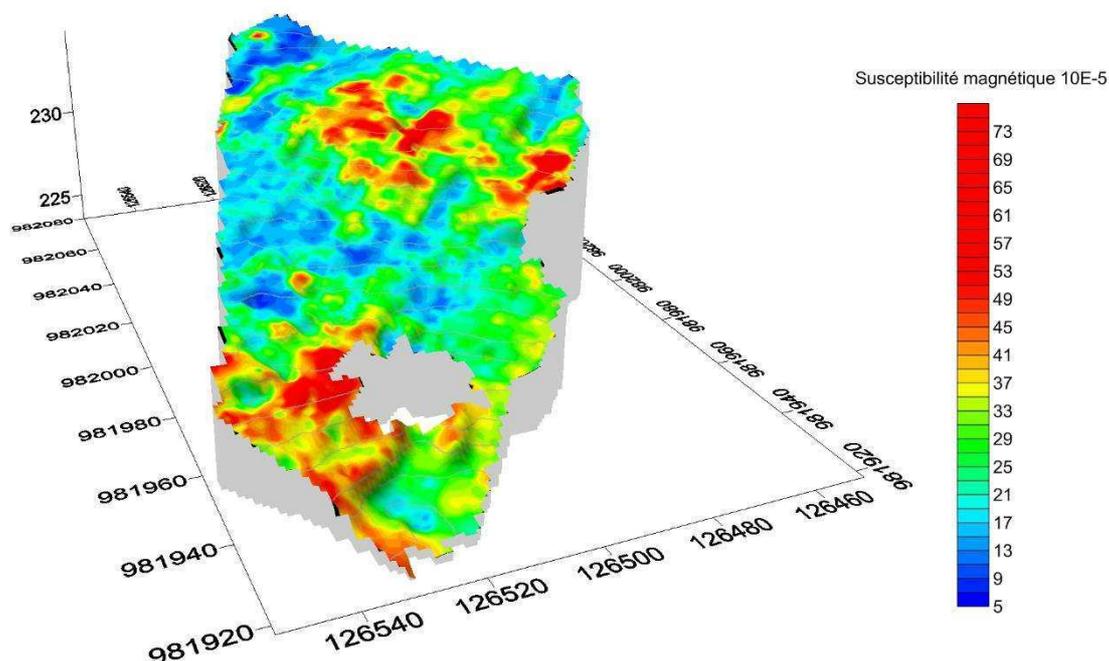


Figure 58 : Carte de susceptibilité magnétique établie sur le relevé topographique de la surface décapée. Aucune corrélation n'est observée entre ces deux types de données ce qui révèle l'indépendance de la susceptibilité par rapport aux variations topographiques.

Des zones faiblement magnétiques entourent certains groupes de structures. Elles pourraient indiquer les limites des « espaces de vie » où se sont déroulées des activités anthropiques ou artisanales peu marquantes en termes de pollution des sols. La mise en relation des pics de susceptibilité avec le plan des maisons n'apporte aucun éclairage. Les plans de bâtiments les plus

évidents ne correspondent pas aux niveaux de susceptibilités les plus élevés, mais à des niveaux plus diffus, néanmoins identifiables. Seules la nature des comblements et le matériel associé pourront indiquer la fonction de ces aires.

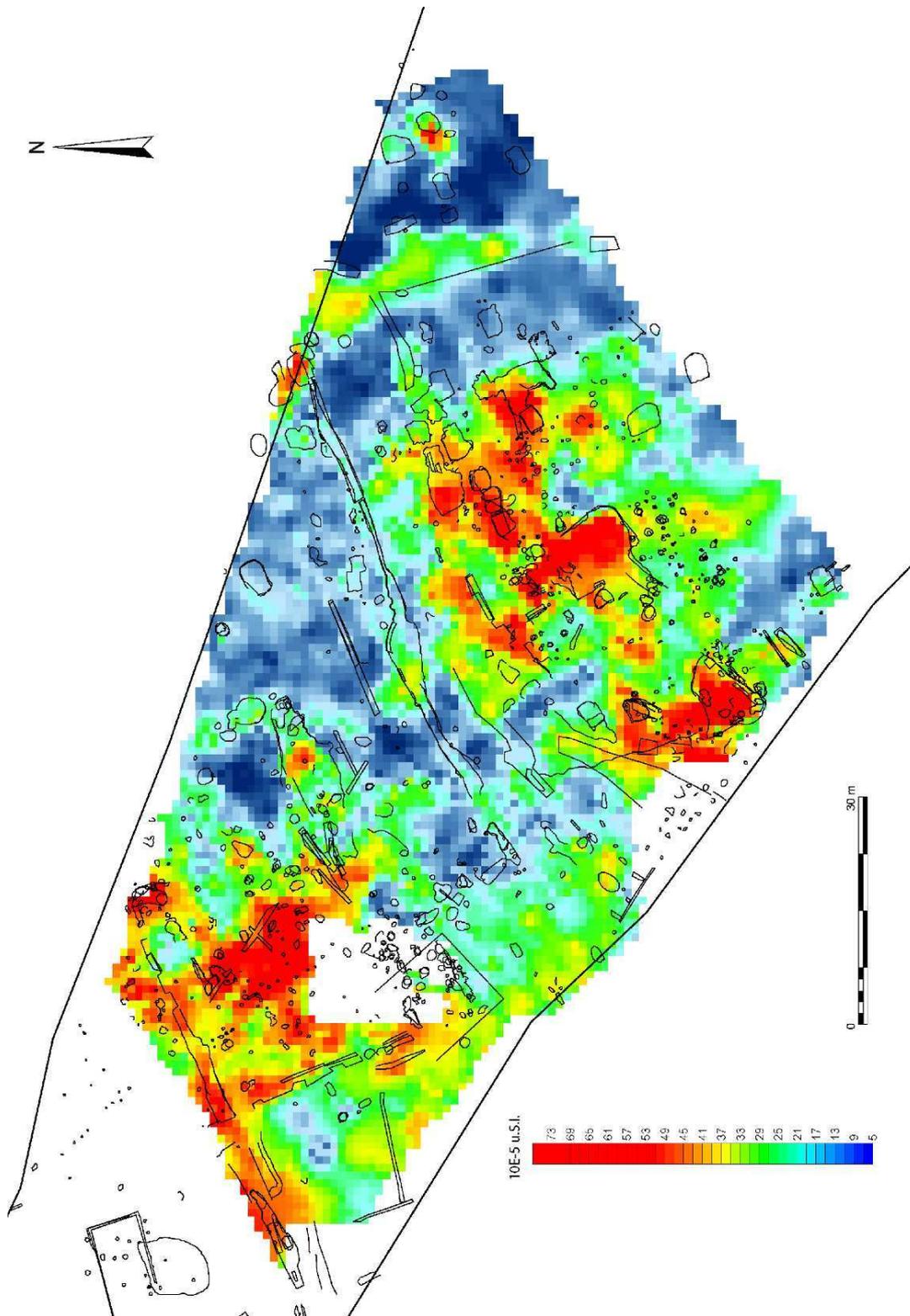


Figure 59 : Carte de susceptibilité magnétique apparente (MS2 de Bartington) (fond F. Reutenauer)

4.1.3.1.3 Mesures hors emprise

Le site a été prospecté avec deux méthodes afin de repérer le plus possible de structures différentes (structures en creux, murs, effondrements, fours, sols, foyers, etc.). Les deux cartes se complètent, notamment dans certains secteurs où les limitations propres à chaque méthode sont bien illustrées.



Figure 60 : Vue générale de la villa gallo-romaine (cliché Quatre Vents)

4.1.3.2 Cartographie de la villa gallo-romaine

4.1.3.2.1 Notes sur les mesures de résistivité électrique :

L'acquisition des données électriques s'est faite en trois temps et sur trois types de terrains. La première prospection, au mois de mars 2009 a fourni les meilleurs résultats, sur un terrain homogène avec une humidité assez importante favorisant un bon contact entre les électrodes et le sol. Les deux dernières ont été menées en février 2011 : la deuxième sur un terrain cultivé jusqu'en 2009 et fraîchement remis en prairie, où le sol compacté n'a pas permis de bon contact, et la troisième sur des labours où le sol relativement sec en surface et très hétérogène a nécessité un lissage des données de prospections assez lourd en raison du très grand nombre de valeurs aberrantes dues aux fractures de retrait présentes dans les 50 premiers cm. La prospection électrique n'a pas été mise en œuvre sur la zone fouillée avant décapage (fig. 60).

Partie ouest :

L'ensemble des prospections réalisé autour de la *villa* a permis la détection de nombreuses anomalies attribuables à des éléments archéologiques qui viennent documenter l'extension et l'organisation de la *villa* (fig. 61).

Un ensemble d'anomalies résistantes linéaires, à l'ouest, dessinent le plan de la *villa* : on peut y voir son prolongement sur 40 m à partir de la limite d'emprise (fig. 62). Ces anomalies déterminent deux espaces, séparés par un couloir de 5 m environ. Dans le premier, le plus à l'ouest, seule une anomalie résistante et fortement magnétique dans le coin nord-ouest pourrait correspondre à une structure rubéfiée et empierrée. Au sud du couloir, une anomalie rectangulaire fortement résistante rappelle certains niveaux observés sur la fouille : il s'agit probablement d'un niveau riche en terre cuite. Au milieu du deuxième espace, une anomalie résistante et magnétique s'oriente dans la même direction que le drain retrouvé à la fouille : un creusement et un empièrrement pourraient en être à l'origine. Deux zones perturbées se situent exactement sur le couloir au nord et au sud sur l'anomalie résistante. Un couloir se dessine peut-être au sud de l'espace 1, mais l'anomalie, très ténue, est à interpréter avec précaution.



Figure 61 : Coupe et plan des fondations, seuls vestiges de la *villa* sur ce site fortement érodé. (clichés A. Bolly)

Au Sud de ce groupe, une anomalie résistante s'étend sur 750 m². Elle apparaît en bordure de l'espace ouest décrit ci-avant et s'étend vers le sud. On peut distinguer au sein de cette anomalie plutôt diffuse trois anomalies linéaires associées à un niveau plus résistant qui forme un rectangle parfait, probablement un bâtiment. Une structure fortement magnétique est visible au centre, au niveau même d'une anomalie très résistante. L'orientation de ce bâtiment présumé est légèrement différente de celle de la *villa*. Dans cette large zone résistante (niveau d'effondrement ou simple niveau plus sableux), on peut observer une anomalie magnétique qui suit l'axe du drain présumé de l'espace 2. Au plus près du ruisseau actuel, la densité d'anomalies chute brutalement (enfouissement ou absence de structures ?).

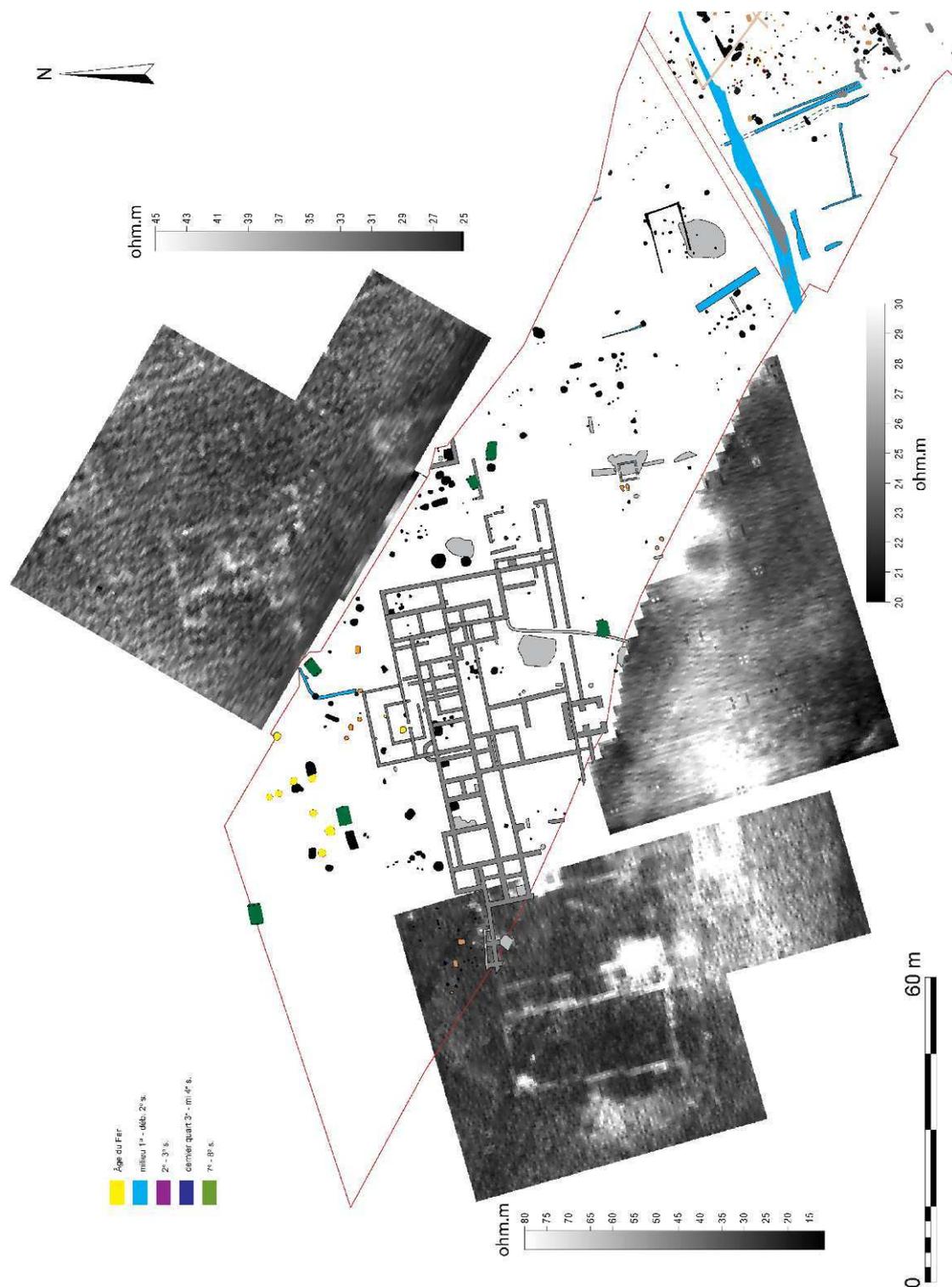


Figure 62 : Carte de résistivité électrique apparente autour de la villa. On peut observer les différences dans le rendu des cartes causées par l'état des sols lors de la prospection : au nord sur terrain labouré, au sud sur un sol compacté et à l'ouest sur une prairie. Ces traitements associés à des états hydriques variables ont induit d'importantes différences de résistivités (fond F. Reutenauer, A. Bolly)

Dans le prolongement du premier bâtiment et au sud de la porte, on observe une grande zone résistante en lien avec l'anomalie de 750 m² déjà évoquée dans la partie ouest. Cette zone paraît moins structurée, on y observe une anomalie fortement résistante et deux anomalies magnétiques, probablement des fosses associées au niveau d'effondrement du premier bâtiment (fig. 63).



Figure 63 : Vue sur le niveau de démolition découvert sur la fouille et cartographié hors emprise avec la prospection électrique (cliché F. Reutenauer). Ce niveau a également induit des perturbations magnétiques.

A l'Est de cette zone, un édifice a pu être identifié par l'analyse conjointe des données électriques et magnétiques. Deux anomalies très résistantes sont situées de part et d'autre d'une zone plus conductrice et reliées par une anomalie résistante linéaire. Les anomalies magnétiques viennent préciser ces observations. Tout d'abord, une zone amagnétique pourrait être corrélée à un niveau de blocs d'effondrement observés lors de la fouille. Une anomalie très magnétique, parfaitement rectangulaire, correspond exactement à l'anomalie résistante. Celle-ci fait ressortir les anomalies linéaires amagnétiques dues aux murs à proximité de ce niveau très magnétique. Il peut s'agir d'un bâtiment de 13 m sur 8, qui suit l'orientation du premier bâtiment, effondré sur sa partie ouest. La partie est marquée par un niveau de terre rubéfiée (pouzzolane), avec la présence de blocs d'effondrement. Les matériaux d'effondrement du bâtiment s'étalent sur environ 300 m².

Au Sud du bâtiment apparaissent deux anomalies très magnétiques, peut-être des éléments métalliques ou des foyers (qui seraient isolés).

La prospection magnétique, sur un sol perturbée par les travaux relatifs au diagnostic, n'a pas permis d'observer les murs de la *villa*, mais seulement deux zones perturbées par les matériaux de construction. Le manque de contraste magnétique entre les structures et l'encaissant explique ce phénomène. Seules quelques anomalies linéaires isolées semblent correspondre aux tranchées de fondations des bâtiments.

Une zone de perturbation magnétique, correspond au bâtiment carré, fouillé. Sur le côté ouest, une grande anomalie magnétique rectangulaire révèle peut-être un niveau perturbé (inclusions d'éléments de terre cuite, oxydation du sol plus importante, phénomènes d'oxydo-réduction et brassages des minéraux magnétiques).

Sur la carte magnétique, la *villa* se prolonge à l'Est par une zone fortement perturbée, avec deux anomalies très fortes. La carte de résistivité électrique présente à cet endroit trois anomalies linéaires qui s'ajustent parfaitement aux amorces de murs observées dans l'emprise. Cet ensemble forme un bâtiment de 11 m sur 15, qui s'oriente parfaitement avec la *villa*, entouré de plusieurs anomalies magnétiques, probablement des fosses. Au Nord de ces bâtiments, les cartes électriques ont révélé la présence d'une construction rectangulaire de 21 m sur 12, avec deux extensions symétriques de 5 m de côté. En son centre, on devine également une structure carrée de 5 m de côté environ, mais il est difficile d'affirmer si cet ensemble est réellement fermé à cause du niveau de bruit. En limite Est du versant, une anomalie résistante longe la *villa* (section sur les différentes extrémités de la carte). Il pourrait s'agir d'un muret d'enceinte ou – son orientation étant strictement identique à celle du parcellaire actuel – d'un élément moderne.



Figure 64 : Vue d'un fond de cabane au sud du site médiéval creusé dans le substrat lœssique (cliché F. Reutenauer)

4.1.3.3 Cartographie de l'extension du site d'habitat alto-médiéval

Une prospection magnétique a été réalisée autour de l'habitat du Haut Moyen-âge (fig. 65) afin de cartographier son extension et de mieux comprendre son organisation. Une première prospection, en amont de la fouille, n'avait pu révéler le détail de l'organisation et la stratigraphie des structures. Cependant, les ensembles les plus conséquents avaient pu être observés. On remarque en effet au nord du site la concordance parfaite entre les fonds de cabanes fouillés et les anomalies magnétiques (fig. 64).

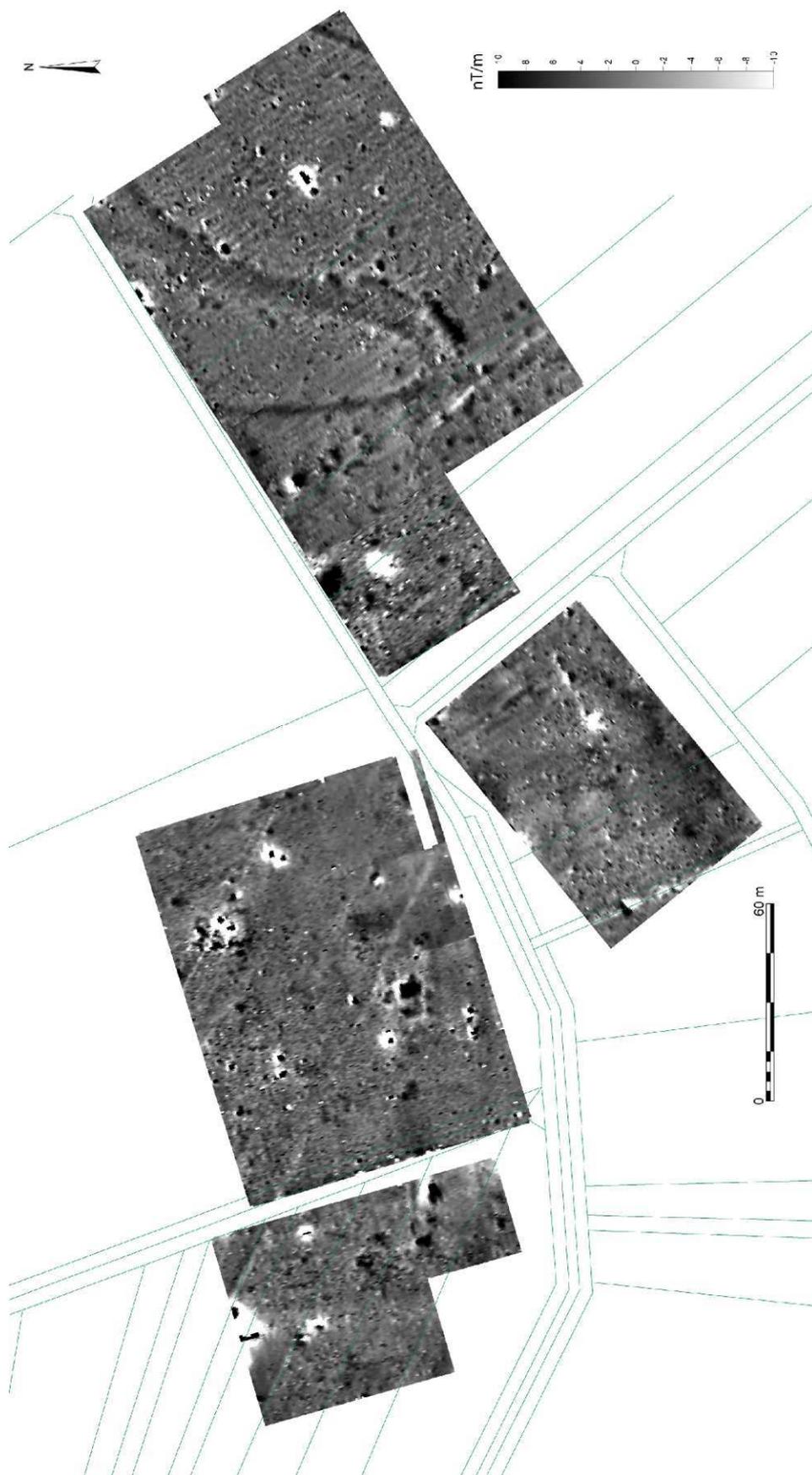


Figure 65 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre

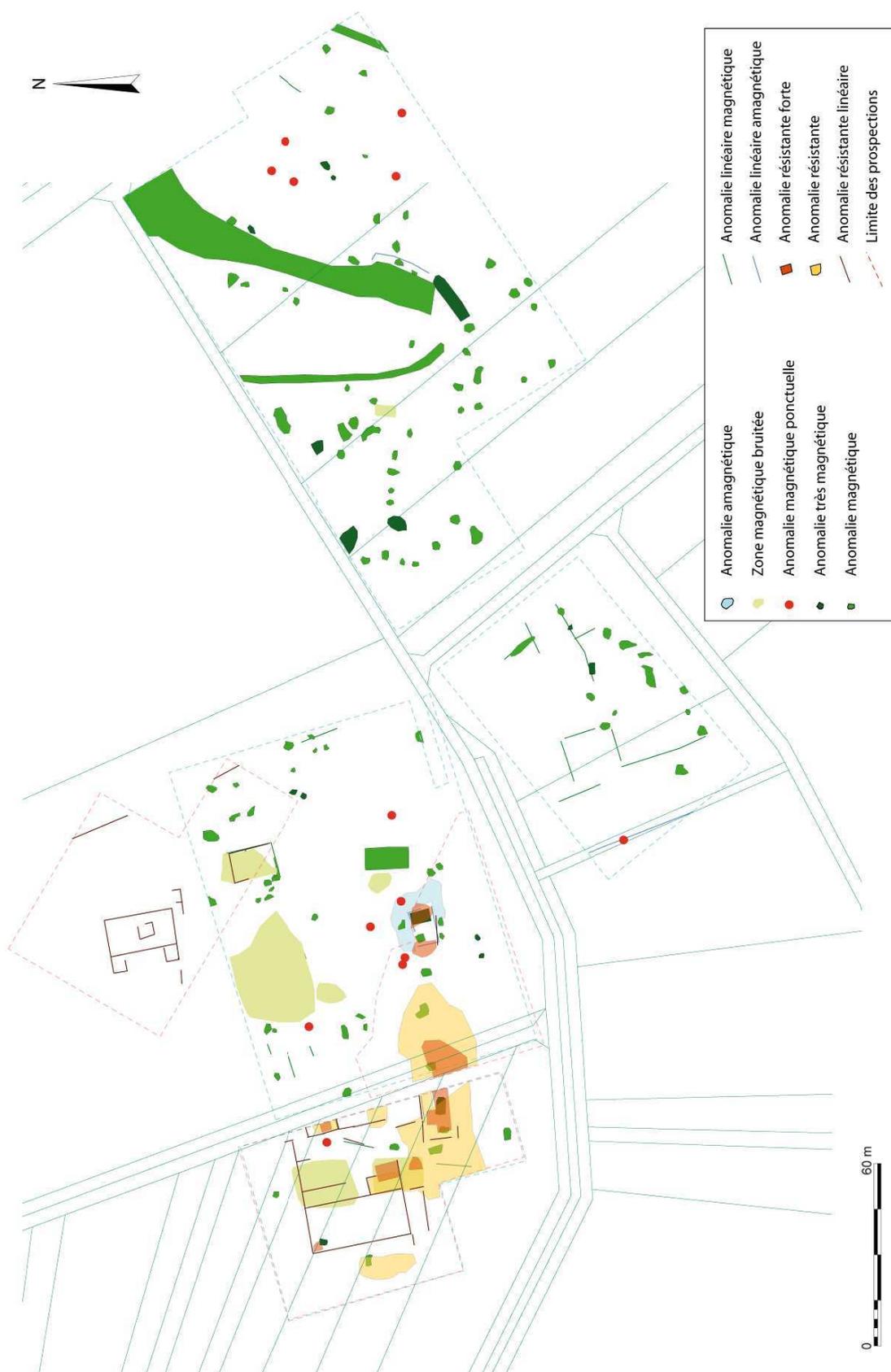


Figure 66 : Carte d'interprétation des cartes de résistivité électrique et du pseudo-gradient magnétique verticale du champ magnétique terrestre



Figure 67 : Vue en plan des empierrements sur la partie médiéval du site de Duntzenheim (clichés F. Reutenauer)

Sur la bordure ouest, peu d'anomalies magnétiques apparaissent sur la carte, ce qui ne permet cependant pas de conclure à la présence ou non de niveaux archéologiques, à cet endroit. La fouille réalisée juste à côté présente en effet un niveau stratigraphique non détecté par la méthode magnétique.

L'anomalie amagnétique à l'extrême ouest de la parcelle prospectée correspond à un effet de topographie : les sillons profonds qui marquent les limites parcellaires en hiver ayant modifié la hauteur des capteurs.

Le site se poursuit à l'est avec un ensemble d'anomalies magnétiques pouvant être en lien avec les fonds de cabanes déjà observés. Une grande anomalie magnétique, de 10 m de large, se prolonge dans la direction des deux fossés parallèles orientés nord-est /sud-ouest suivant une autre orientation, et semble continuer sous la route actuelle. La topographie du site ne permet pas d'expliquer l'origine de cette anomalie, bordée par quelques anomalies plus ponctuelles pouvant signaler des fosses, dont la densité paraît s'atténuer au fur et à mesure que l'on se dirige vers l'est (fig. 67). Dans la partie nord du site, plusieurs fosses sont apparentes dont certaines avec sans doute un comblement particulièrement magnétique. Une anomalie linéaire dans le sens de la pente semble poursuivre le chemin fouillé dans la partie sud-est. Une anomalie très magnétique d'assez grande dimension prolonge un des fossés observés sur le site. En raison de son comblement particulier - probablement d'origine métallique (battitures, scories ?) – il peut s'agir d'une structure liée à une activité artisanale. Enfin, en bordure

ouest de la prospection, on peut observer un fossé rectiligne sur un tronçon malheureusement trop étroit pour l'attribuer avec certitude au site médiéval.

Diverses applications des méthodes géophysiques ont pu être mises en œuvre sur le site de Duntzenheim. L'intérêt de ce site est triple. D'abord la variété des types de structures a permis de confronter les sensibilités des différents outils (fig. 66). De même, la diversité du recouvrement et du substrat a induit d'importantes variations de contrastes entre les différentes structures en fonction de leur localisation. Enfin l'accessibilité des parcelles voisines à la fouille et un décapage extensif a permis une mise en œuvre aisée de l'acquisition de donnée. C'est donc un cas tout à fait intéressant où la géophysique s'avérée être un outil efficace dans l'analyse du site comme association avec les résultats de la fouille archéologique tant sur le site antique que médiéval.

4.2 Steinbourg – Altenberg, Ramsberg -

Sur la commune de Steinbourg, le diagnostic de la trace et d'une zone de dépôt de matériaux adjacente de la LGV-Est Européenne 2^{ème} phase et d'une zone de dépôts a fait l'objet d'une prospection géophysique (fig. 68). Des indices d'occupation correspondant à une villa gallo-romaine avait été découverts sur le tracé de la ligne et laissaient présager une extension de l'occupation sur la zone de dépôts.

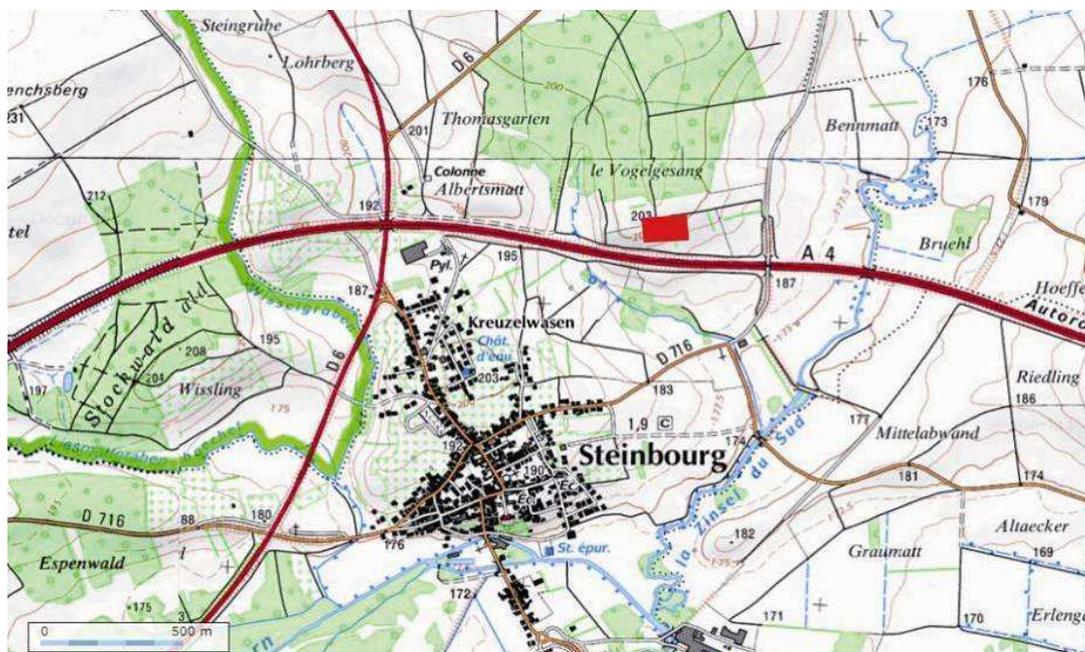


Figure 68 : Carte de localisation du site de Steinbourg (source IGN)

1,2 hectare de prospections électriques et 2 hectares de prospections magnétiques ont permis d'appréhender le prolongement sud de l'établissement antique, au préalable à l'ouverture par sondages systématiques (Peter, 2009). Ces sondages ont été implantés selon une géométrie classique de

tranchées en quinconce avec une ouverture de 10,53 % de la surface totale. La prospection a été réalisée au printemps, avec un versant en culture et un sommet « boisé ».

4.2.1 Contexte géomorphologique

Le site est localisé dans le champ de fracture de Saverne, région de forte variabilité géologique, à proximité d'un méandre de la Zinsel. Le flanc sud de la colline, où est installée la villa, présente deux faciès jurassiques : des marnes gris-clairs et des marnes silteuses gris-bleus à nodules calcaires et ferrugineux, toutes deux affleurantes (Peter, 2009).

La forte pente - 6 % - associée à ce substrat, a entraîné la formation de trois faciès superficiels. Au nord, le substrat marneux compact à bancs calcaires isolés et locaux (structure en pavées), est presque affleurant (40 cm). Sur le versant et en bas de pente, un niveau de colluvionnement de texture limono-argileuse, riche en terre cuite et en nodules calcaires, comportant une importante fraction argileuse, semble s'être mis en place par solifluxion. A l'est de la *villa*, le terrain est marqué par des formations sableuses, rougeâtres, homogènes et meubles, probables dépôts de la Zorn, exempts de matériel archéologique (fig. 69).



Figure 69 : Vue des différences de recouvrement entre les parties est et ouest du site de Steinbourg : à gauche les niveaux argileux du haut de versant associés à un très faible recouvrement des structures, à droite les niveaux sableux à l'ouest, plus épais (clichés C. Peter).

Les résultats du diagnostic permettent de préciser les relations entre les dynamiques sédimentaires et la conservation des vestiges archéologiques. Les niveaux limono-argileux peu épais en amont se retrouvent en aval dans des niveaux de colluvions qui atteignent 2 m de puissance stratigraphique. Sur le substrat argileux, une occupation avant la période antique semble peu probable : les premiers bâtiments qui y sont implantés indiquent que les processus d'érosions étaient déjà en cours. A l'est et à l'ouest du bâtiment carré, des apports de terre pourraient constituer la base d'un niveau de circulation. En contrebas, dans les parties superficielles, les sondages archéologiques ont révélé des niveaux de réoccupation datables de l'époque antique. Un dense réseau de drains orientés nord-sud dans le sens de

la pente, a permis d'éviter des glissements plus conséquents et a favorisé l'assèchement de ce terrain argileux.

4.2.2 Contexte archéologique

Les vestiges découverts lors de la phase de diagnostic (sur une surface de 3 hectares) sont essentiellement antiques (fondations, murs, empierrements, trous de poteaux, structures rubéfiées). Les niveaux d'apparition des structures, qui varient entre 0,3 m de profondeur sur le sommet et 1,5 m en contrebas, sont fonction de leur situation et de leurs relations avec la dynamique sédimentaire.

Les éléments observés ont révélé la *pars rustica* de la villa, les éléments maçonnés retrouvés sur le tracé de la LGV constituant la *pars urbana*. Dans son prolongement, plusieurs structures, associées à une stratification complexe, se développent autour d'un bâtiment rectangulaire. Les vestiges et la stratigraphie sont bien conservés en bas de pente grâce aux phénomènes de colluvionnement. Le mobilier date le site du 2^{ème} siècle après J.-C.

A l'ouest, des structures rubéfiées (un four et plusieurs trous de poteaux) révèlent l'existence d'un établissement annexe ou d'un prolongement du site antique affecté à une activité artisanale. Cette zone pourrait avoir été occupée dès le 2^{ème} siècle. Des éléments du Premier Moyen-âge (drains et fossés) témoignent d'une occupation au 10^{ème} siècle, le site ayant ensuite été utilisé comme carrière jusqu'à l'époque moderne (tranchées de récupération). Un nombre important de drains traverse le terrain dans le sens de la pente. Des éléments s'échelonnant de l'époque antique à l'époque contemporaine y ont été retrouvés. Depuis la réalisation de ce diagnostic, le site a fait l'objet d'une fouille dont les résultats n'ont pas encore été traités. La comparaison se limite donc au diagnostic.

4.2.3 Résultats géophysiques

Les cartes révèlent de fortes variations de résistivités électriques qui sont dues à la nature du recouvrement (fig. 71). Ces variations de faciès géomorphologiques ont été retrouvées lors de l'ouverture par tranchée. Sur le haut de la colline de faibles valeurs de résistivité mettent en évidence la proximité du substrat argileux (marnes gris-bleu). A l'est, où l'on note la présence de sable, ce niveau devient progressivement résistant. Le bas de pente présente des valeurs moyennes de résistivités électriques représentatives de l'accumulation de colluvions. La limite entre la zone faiblement résistante (argile) et la zone moyennement résistante (colluvions) coïncide avec une anomalie linéaire résistante correspondant à un mur retrouvé lors de la fouille. Celui-ci a pu jouer un rôle dans la différenciation des dépôts des niveaux de colluvionnements en contrebas et des aménagement en amont, identiques à ceux observés autour du bâtiment carré (fig. 72).

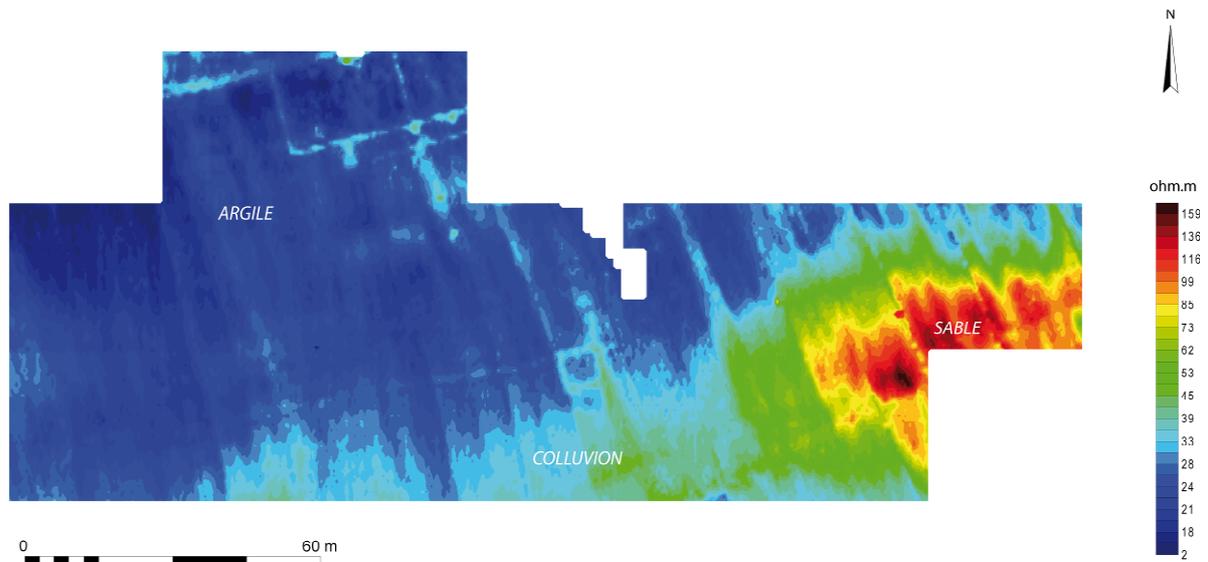


Figure 70 : Carte de résistivité électrique apparente qui présente de forts contrastes dus à la nature géologique du recouvrement

Un filtre régional avec une longueur d'onde de 40 m a été appliqué pour atténuer les variations de résistivité dues au faciès sédimentaires et exacerber les contrastes traduisant des structures plus localisées (fig. 71).

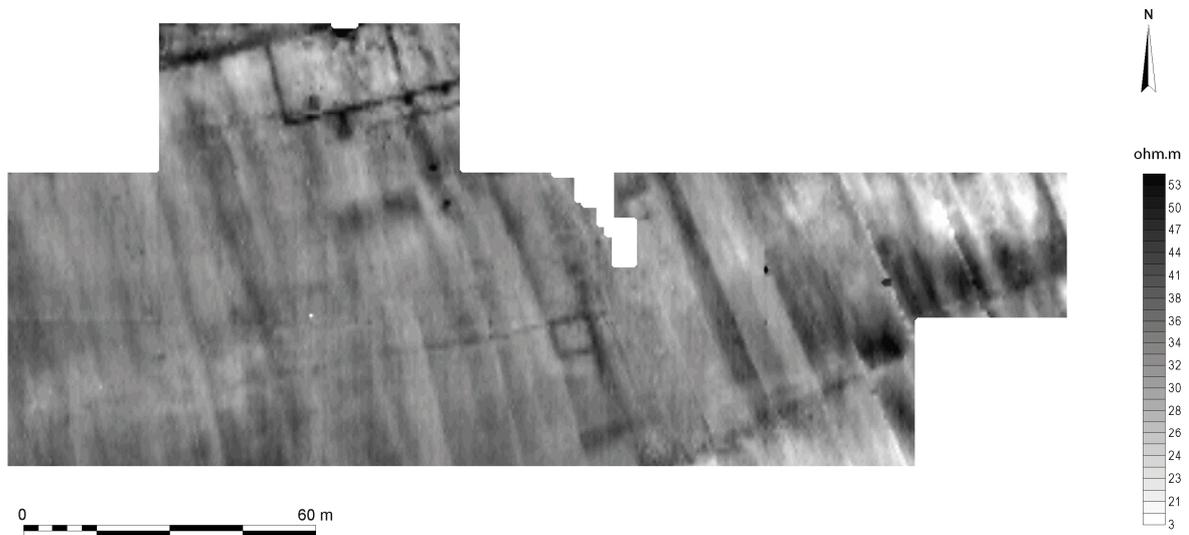


Figure 71 : Carte de résistivité électrique apparente après filtrage des données (filtre régional)

Certaines anomalies observées sur la voie 1 (0,5 m d'écartement entre les électrodes) ne sont pas visibles sur la voie 2 (1 m d'écartement entre les électrodes). On les doit donc à des structures très proches de la surface (à moins de 50 cm) et probablement assez mal conservées. Elles sont suffisamment proches de la surface et peu profondes pour que l'influence de la structure dans le volume de sol investigué avec un écartement d'un mètre soit quasiment nulle sur la mesure de résistivités apparentes. Cette remarque réalisée à partir des observations sur la voie 1 ne nécessite pas

d'inversion des données. L'application de la régionale a entraîné une inversion des contrastes qui s'explique par la prise en compte des variations de grandes longueurs d'ondes.



Figure 72 : Vue générale des tranchées et du bâtiment rectangulaire et des importants niveaux de colluvionnement qui recouvre les empièvements médiévaux (clichés C. Peter)

A l'ouest, sur les niveaux argileux, les contrastes entre les structures empièrées et l'encaissant entraîne la formation d'anomalies résistantes : il s'agit de drains, comblés postérieurement par des limons. A l'est, l'encaissant sableux résistant donne lieu à la formation d'anomalies conductrices car dans ces niveaux le comblement est moins résistant que l'encaissant sableux. Ces anomalies sont causées par des structures excavées comblées par les limons de surface. Dans cette partie du site, il faut être prudent sur l'existence de structures car le contexte sableux peut empêcher la détection de structures en pierres. Aucune structure n'y a cependant été détectée lors du diagnostic. Sur les cartes de la voie 3 (1,5 m d'écartement entre les électrodes) on repère des anomalies résistantes qui n'ont pas été détectées sur les deux premières voies. Elles révèlent donc des structures plus profondes, recouvertes par les niveaux de colluvionnement.

Sur la carte magnétique on ne distingue pas les tranchées des fondations du bâtiment antique (fig. 73), au comblement peu magnétique par rapport à l'encaissant. Elle semble au premier abord apporter moins d'informations que celles issues des mesures électriques. Au sud, plusieurs anomalies amagnétiques correspondent à des empièvements et des épandages de mobilier et de matériaux. La

proximité d'éléments modernes en surface n'avait pas permis d'affirmer l'existence de structures d'origine archéologique, mais uniquement de révéler l'existence de perturbations. Comme sur de nombreux autres sites, on a pu observer de nombreuses anomalies de très fortes amplitudes très localisées corrélées à la présence d'éléments en fer en surface. Quelques anomalies de plus faible amplitude pourraient cependant signaler des structures en creux.

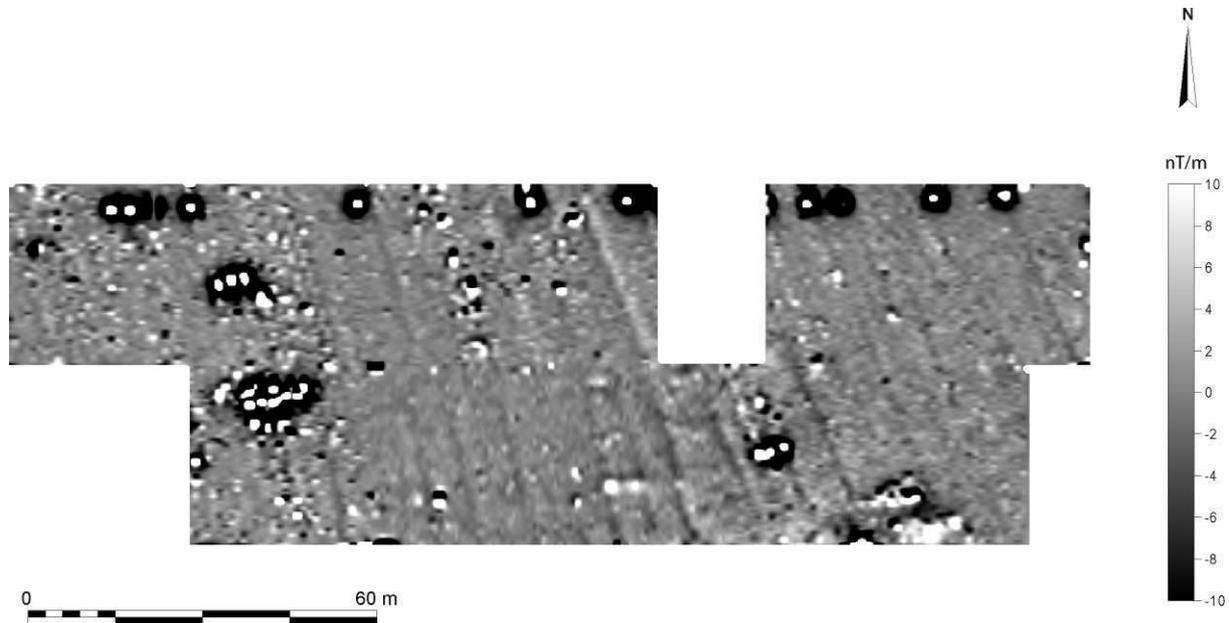


Figure 73 : Carte des anomalies du pseudo-gradient vertical du champ magnétique terrestre. On remarquera l'absence du bâtiment carré à l'inverse des nombreux drains découverts ensuite lors des sondages.

Au nord, le bâtiment antique a très bien été reconnu, principalement sur l'emprise du tracé. Les contrastes de résistivité électrique permettent d'étudier très précisément son plan. Les anomalies révèlent donc des structures à de faibles profondeurs, moins de 50 cm, avec un niveau de conservation probablement assez mauvais. Des anomalies résistantes étendues dans le secteur sont probablement à mettre en relation avec des niveaux d'effondrement contenant des matériaux de constructions. Au sud du bâtiment et suivant son orientation, des anomalies linéaires résistantes s'étirent jusqu'à un édifice testé lors du diagnostic. Perpendiculairement à ces anomalies et dans le prolongement du mur nord de l'édifice, un mur (anomalie résistante) part à l'ouest le long du flanc du versant et marque la différence de faciès géomorphologique. En contrebas, on a pu repérer un ensemble d'anomalies à la fois résistantes et magnétiques, à des structures artisanales associées à des empierrements contenant des éléments rubéfiés détectés lors du diagnostic.

Un des empierrements dans le niveau de colluvions forme une anomalie résistante, qui devient conductrice lorsque le substrat change de faciès et devient sableux. Le filtrage a modifié ici les valeurs de résistivités électriques apparentes. Ce n'est pas la nature des matériaux utilisés qui diffère ici mais l'encaissant géologique.



Figure 74 : Vue des drains empierrés ou/et fossoyés (clichés C. Peter)

Enfin, de nombreuses anomalies apparaissent dans le sens de la pente, présentant des contrastes de résistivité électrique ou d'aimantation magnétique, parfois les deux. Elles sont dues au dense réseau de drain, en matériaux divers : terre cuite pour les plus récents, et maçonnerie pour les plus anciens (fig. 74).

La prospection réalisée en amont du diagnostic s'est avérée efficace. Elle a pu être mise en œuvre grâce aux présupposés qui découlent de la découverte d'un secteur de la villa (fig. 75). La richesse des éléments résistants a entraîné une moins grande attention portée aux anomalies magnétiques qui se sont avérées lors de la fouille tout à fait pertinentes puisqu'il s'agissait de structures domestiques et artisanales associées à des périodes alto-médiévales et à des activités annexes à celles observées plus au nord dans les bâtiments. Les fortes variations de nature géomorphologique laissent entrevoir les difficultés potentielles pour l'interprétation des anomalies et la compréhension des structures sur des sites où la combinaison de l'information géophysique avec les observations de terrains n'est pas possible.



Figure 75 : Carte d'interprétation des données géophysiques sur le site de Steinbourg (fond F. Reutenauer)

4.3 Bernolsheim – Plateforme d'Activité Départementale –

L'opération de Bernolsheim - Plateforme Départementale d'Activité de Brumath et Environs - couvre une superficie de 120 ha, ce qui en fait l'un des projets majeurs d'aménagement récents de la région (fig. 76). Le diagnostic s'est déroulé au cours de l'hiver 2009 et a permis la découverte de nombreux vestiges, ce qui a donné lieu à une première campagne de fouille en 2011, au nord de la RD421. Trois secteurs ont fait l'objet de prospections géophysiques (Fleischer *et al.* 2011).



Figure 76 : Carte de localisation du site de Bernolsheim (source IGN) et vue générale du site en cours de fouille et d'aménagement (clichés Quatre Vents)

La première, réalisée sur et autour de la fenêtre 1 de la fouille (fig. 77), n'a permis la détection d'aucune structure supplémentaire à celles déjà repérées lors du diagnostic, si ce n'est des perturbations imputables aux tranchées de sondage. Le décapage a exhumé moins d'une dizaine de structures, dont certaines avaient déjà été reconnues lors du diagnostic. Nous ne traiterons donc pas cet exemple car en l'absence de structures il n'apporte pas d'éléments critique ni à la prospection, ni à la fouille qui a suivi.

Sur le secteur 2, une prospection magnétique avant décapage a également été menée, sur et autour de l'emprise de la fouille, afin de documenter les abords immédiats du site tout en donnant des

éléments de comparaison entre les structures observées et les structures détectées en géophysique. Ces dernières ont permis d'étendre l'emprise de la fouille après la découverte de trois enclos funéraires assez conséquents, associés à des anomalies générées par le comblement des sépultures.

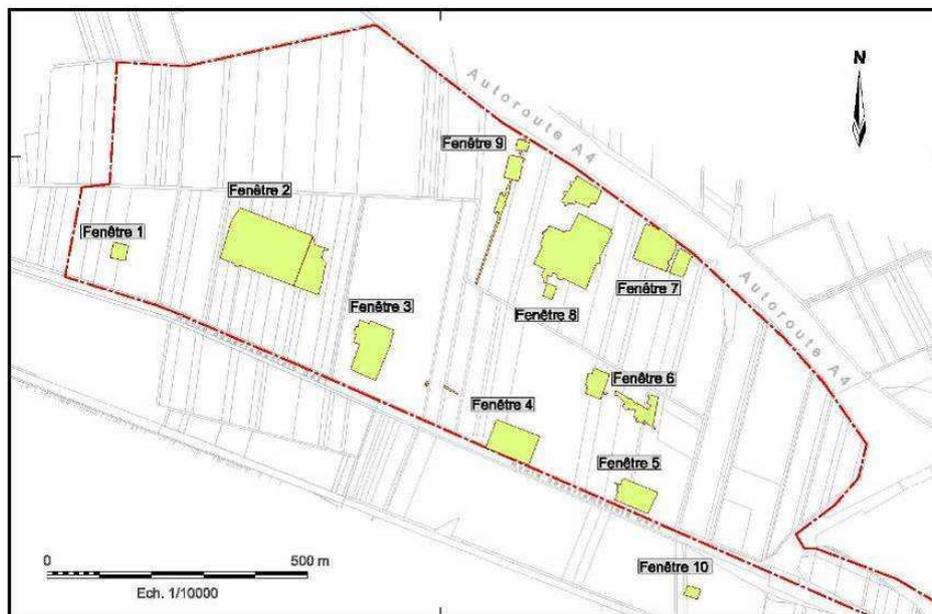


Figure 77 : Carte de répartition des fenêtres de fouilles sur l'emprise du projet de PDA de Brumath et Environs (Fleischer *et al.* 2011)

Enfin, une troisième campagne de mesures a été réalisée sur la zone 3. Le manque de lisibilité des fosses des sépultures du Grossgartach, surtout détectables grâce au mobilier qu'elles contiennent, a conduit à tester les éventuels contrastes de susceptibilité magnétique entre les structures et l'encaissant. Les mesures ont cependant été effectuées sur des structures présumées à partir de la présence de matériel ou de l'existence des quelques rares contrastes de couleur entre un substrat loessique très clair et des comblements légèrement plus sombres.

L'opération n'étant achevée que depuis la mi-novembre 2011, les données de fouille ne sont pas encore traitées et commencent tout juste à être archivées. Il faudra donc attendre pour confronter précisément les données de fouilles avec les résultats géophysiques afin de comprendre la variabilité du signal observé.

4.3.1 Contexte géologique

Le site de Bernolsheim est implanté en limite nord-ouest du cône de déjection de la Zorn, rivière vosgienne qui incise le plateau du Kochersberg et qui a formé ici une terrasse alluviale avec des accumulations de cailloutis de couleur brun-rouille caractéristiques des dépôts du massif vosgien. Les

formations sableuses et gravelo-sableuses du Pliocène sont recouvertes par des plaquages de loess (Peter 2010).

On observe trois séquences de dépôts successifs : un substrat argileux et gravelo-argileux du Pliocène, des argiles brunes et sableuses (terrasse riessienne de la Zorn) et des niveaux de colluvionnements sableux postérieurs à l'Antiquité.



Figure 78 : Vue des sépultures découvertes au centre des enclos reconnus par la géophysique et qui avait échappés au diagnostic archéologique (clichés F. Fleischer)

En haut de versant, le substrat est constitué d'argiles jaunâtres sans inclusion, homogènes et compactes. A mi-pente, le substrat est formé de graviers de couleur jaunâtre dans une matrice argileuse compacte avec des tâches d'oxydo-réduction dans laquelle des structures archéologiques ont été creusées. En bas de pente, des niveaux sableux sont le produit du colluvionnement des niveaux supérieurs et contiennent également des structures archéologiques. Les niveaux de colluvionnement recouvrent les sables rougeâtres et certains vestiges archéologiques. Ce sable brun, hétérogène et peu compact, se caractérise par une porosité moyenne et semble s'être mis en place par solifluxion.

Sur la fenêtre 2, secteur ayant fait l'objet d'une prospection géophysique, la profondeur d'apparition du toit du substrat varie fortement : 1m dans la partie haute et seulement 30 à 50 cm sur la barre de graviers centrale. En bas de pente, le substrat apparaît de nouveau à 1 m au sud de la barre de gravier. En surface, 30 cm de terre végétale recouvrent 20 à 40 cm de limon argileux beige dans la partie centrale, puis 30 à 50 cm de limon-argileux brun rose au nord et au sud de la terrasse de gravier.

4.3.2 Contexte archéologique

Les zones 2 et 3 ont révélé des occupations du Néolithique ancien – Rubané – au Néolithique moyen – Grossgartach (4900-4600 av. J.-C.), quelques traces d’occupations de l’âge du Bronze, et des aménagements funéraires antiques bordant une voie romaine.

Trois maisons et une nécropole avec une quarantaine d’inhumations sont attribuables au Néolithique moyen. L’association de ces maisons qui présentent des plans complets et d’une nécropole à proximité donne à ce site un caractère exceptionnel pour l’Alsace. Une seconde nécropole de la même période a été repérée et fouillée à l’est, ainsi que des fosses d’extraction contemporaines.

L’implantation de deux espaces funéraires (fenêtre 2 et 7) avec quatre tumuli, dont trois entourés d’une palissade, sont associés à une douzaine d’inhumations et révèlent une occupation de l’Age du Fer (fig. 78). Des fosses et silos protohistoriques ont également été repérés. Datant du 1^{er} siècle, sept enclos funéraires (fig. 79) et plusieurs incinérations organisées autour d’un ancien tertre central forment une autre nécropole au Nord. Ces deux espaces funéraires sont séparés de 650 m. Il est difficile de déterminer s’il s’agit d’un vaste ensemble ou de deux nécropoles. Cette question reste actuellement en suspens comme à Sainte-Croix-en-Plaine.



Figure 79 : Vue de l’enclos funéraire reconnu en géophysique, on remarque l’importante profondeur des structures fossoyées (clichés F. Fleischer)

Le site est implanté en périphérie de *Brocomangus* (actuelle Brumath), importante agglomération antique entre le 1^{er} et le 3^{ème} siècle après J.C. La voie romaine qui relie celle-ci à Saverne a été reconnue sur un tronçon long de 1 km. De part et d'autre se développe une nécropole composée de plusieurs enclos funéraires associés à une vingtaine d'incinérations. Au sud, un établissement rural antique sera fouillé les prochaines années. Un système antique d'adduction en eau souterrain a été reconnu sur 300 m. Il est profond de 6 m et a été excavée à partir de 10 puits équidistants.

Au cours des périodes modernes l'espace est occupé et aurait une fonction agricole d'après les bornages, les fossés de drainage et les fosses diverses reconnues sur le terrain.

4.3.3 La prospection magnétique du secteur 2

La prospection magnétique réalisée sur et autour du secteur 2 du projet de fouille couvre une superficie de 5,25 hectares, où un très grand nombre d'anomalies a été identifié.

Sur la carte d'intensité du champ total (fig. 82), on peut observer de grandes variations, d'origine géologique. On distingue très nettement la terrasse au milieu de la carte, laquelle permet de repérer un grand nombre d'anomalies par les contrastes importants qui existe entre le gravier et les comblements limoneux. A l'est de la prospection et au nord de la terrasse prend place un niveau très magnétique. Au sud, de grandes variations traduisent des changements de faciès géomorphologiques. Le nord et le sud correspondent aux secteurs limoneux alors que la zone centrale coïncide avec la terrasse. Au sud, de nombreuses anomalies semblent s'étendre sur la partie limoneuse alors qu'au nord la limite est très nette entre la terrasse et le comblement limoneux dépourvu de toutes structures archéologiques. Dans le coin nord-ouest de la zone étudiée, une anomalie très forte signale un aménagement agricole récent.

En fonction des différentes réponses des faciès géologiques, on peut observer sur les cartes magnétiques les traces des tranchées du diagnostic effectué durant l'hiver 2009, qui apparaissent le plus nettement dans les zones où l'aimantation est la plus importante (fig. 83). Dans ces niveaux, les brassages de sols – dus aux sondages – entre les niveaux superficiels probablement magnétiques et les niveaux plus profonds moins magnétiques ont entraîné d'importants contrastes d'aimantation. Dans ces secteurs, l'impact du diagnostic est donc important sur les mesures de champ total.

On distingue très nettement les deux fossés reconnus en 2009, constituant les deux bordiers de la voie romaine (fig. 84). Sur les 350 m de long sur lesquels celle-ci a été reconnue, l'amplitude de l'anomalie varie fortement, en fonction du sédiment dans lequel les fossés ont été creusés. Sur la terrasse le contraste est positif – le comblement est plus magnétique que le substrat gravelo-sableux – alors que dans le prolongement on observe une inversion du contraste magnétique – le substrat

limoneux est alors plus magnétique que le sédiment qui a comblé le fossé, probablement des graviers ou des niveaux de recharge de la voie romaine venus s'y déverser. Enfin, à l'extrême ouest, on devine encore le fossé mais dans cette zone limoneuse le signal magnétique du comblement est quasiment similaire à celui du substrat. Ces variations sont très importantes car elles impliquent une forte variabilité de détectabilité à l'échelle d'un site en fonction des faciès sédimentaires rencontrés. Ce double fossé peut donc servir d'étalon pour l'interprétation des anomalies et leur représentativité par rapport aux structures archéologiques. De plus, on remarque qu'il peut exister une variabilité des propriétés magnétiques au sein d'un même ensemble sédimentaire, comme la couche limoneuse qui vient prendre appui sur la terrasse de graviers au nord.



Figure 80 : Vue générale de la maison Grossgartach découverte sur la fenêtre 2 de la fouille, la faible profondeur du fossé explique son absence sur la carte d'anomalies magnétiques. L'angle du bâtiment non conservé semble a priori correspondre à une anomalie magnétique légère, peut-être associée à un fantôme magnétique (clichés F. Fleischer)

En plus du double fossé, on distingue un très grand nombre d'anomalies de moyenne amplitude que l'on pourrait attribuer à des structures archéologiques. La confrontation avec les données de la fouille a permis d'affiner ces observations (fig. 80) : sur l'ensemble de ces structures, certaines correspondent à des structures archéologiques type fosses et fossés et d'autres à des chablis. Aucun indice sur les mesures d'intensité du champ total ne vient expliquer ce phénomène. Après une lecture attentive, on a pu se rendre compte que certaines anomalies présentaient déjà des formes particulières qui rappelaient celles des chablis. Cette remarque n'est valable que pour les anomalies les

plus fortes et les moins profondes, où la diffusion de l'anomalie en surface en raison de la profondeur de la source est faible. Cette similitude de réponses entre chablis et fosses est due aux éléments contenus dans le comblement des chablis : on y a en effet retrouvé des éléments de terre cuite et des traces de charbons et de terre rubéfiée (fig. 81). La forte signature de ces chablis pourrait également trouver une explication dans un processus anthropique d'occupation de cet espace avant, après ou pendant l'implantation et le développement d'une forêt. Peut-être s'agit-il de trace d'essartage. Cette hypothèse sera à vérifier avec des analyses géomorphologiques complémentaires. Il est néanmoins troublant d'observer des chablis aussi nettement. Ces contrastes d'aimantation entre creusement naturel et encaissant géologique n'est pas courant même s'il a pu être rencontré sur d'autres sites.

Outre ces nombreuses anomalies correspondant à des structures qui avaient été en partie observé lors du diagnostic, la prospection a révélé l'existence de deux enclos funéraires, dont un de plus de 30 m de diamètre. La fenêtre de fouille centrée sur des observations réalisées en de difficiles conditions hivernales ne tenait pas compte de ces informations, et le Service Archéologique Régional ignorait alors l'existence de ces enclos. La prospection géophysique a donc permis d'étendre l'emprise du projet de fouille et d'inclure ces éléments dans la prescription. De plus, au vu de la lecture du fossé, elle permettait d'envisager un assez bon niveau de conservation de plusieurs fosses, dont une, centrale, pouvait correspondre à une tombe. Les tumuli ont livré des sépultures remarquables, riches en mobilier, avec des traces de conservation des bois de coffrage.



Figure 81 : Vue d'un probable chablis découvert sur la fenêtre 2 (cliché F. Fleischer)

A l'inverse, la confrontation des plans a permis de voir qu'un des fossés d'un enclos double n'a pas été reconnu en géophysique, probablement à cause de ses dimensions (faible largeur). Il en est de même pour plusieurs sépultures qui n'ont pas été détectées en géophysique.

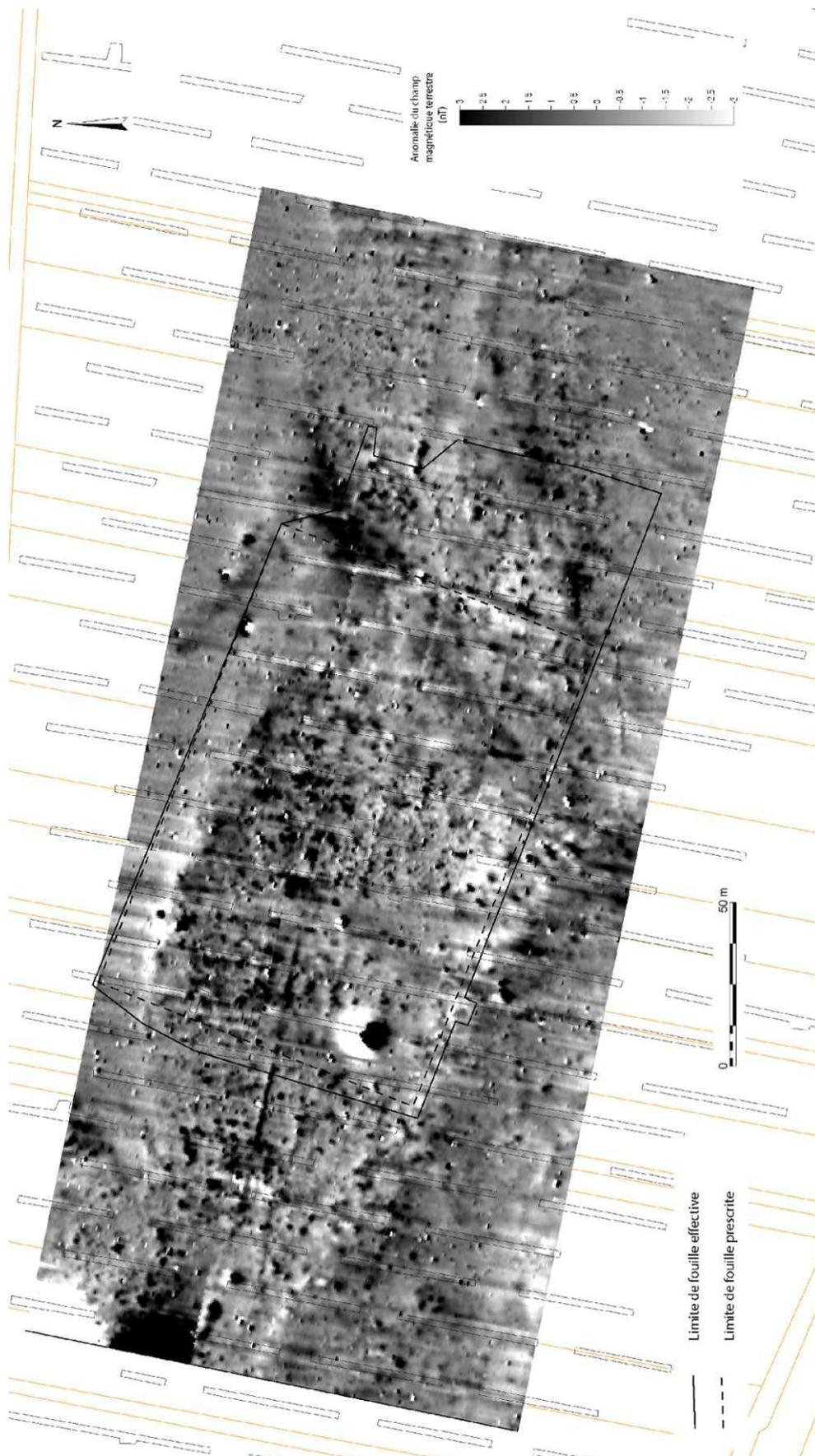


Figure 82 : Carte de l'intensité totale du champ magnétique terrestre. On y distingue les limites des ensembles géomorphologiques majeurs (fond F. Fleischer).



Figure 83 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre, les grandes anomalies y sont estompées et les petites mises en exergue par cette configuration de mesure. (fond F. Fleischer)



Figure 84 : Confrontation des données de prospections magnétiques et des résultats de la fouille de la fenêtre 2, de nombreuses structures concordent entre observations de terrain et prospection magnétique. Certaines structures de trop petites tailles n'apparaissent pas sur les cartes, alors que certaines anomalies ne semblent pas avoir été perçues lors de la fouille (fond F. Fleischer)

4.3.4 Les mesures de susceptibilité magnétique sur la nécropole Grossgartach.

Des mesures de susceptibilité ont été réalisées sur la fenêtre 3 avec le MS2-D de Bartington, en réponse au manque de contraste entre les fosses de sépultures et le substrat limoneux. Les sépultures ont initialement été repérées d'après les éléments mobiliers qu'elles contenaient, situation déjà rencontrée sur d'autres sites (Koziol 2012, Landolt 2012), ce qui implique un décapage jusqu'au niveau d'apparition de ces objets. Sa profondeur est difficile à estimer à cause des variations des profondeurs des fonds de fosses. A titre expérimental, nous avons donc essayé de mesurer des contrastes de propriétés magnétiques entre le comblement des sépultures et l'encaissant géologique, mesures qui n'ont pu être menées sur toute l'étendue de la nécropole par manque de temps alloué au projet.

Il s'avère que les valeurs de susceptibilité magnétique sont nettement plus importantes dans le comblement des structures invisibles ou quasi-invisibles que sur le substrat. Quatre sépultures ont été choisies comme exemples sur les douze testées

Sépulture 3212

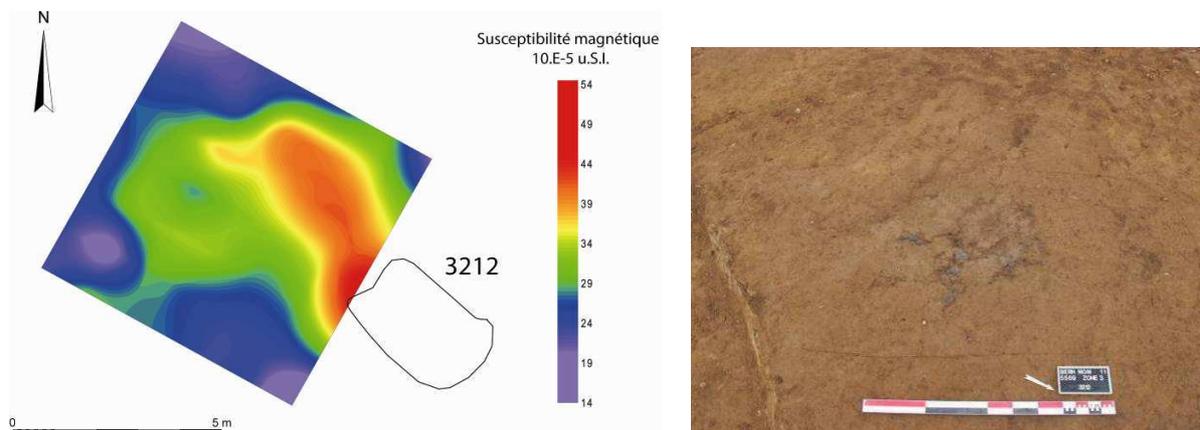


Figure 85 : Carte de susceptibilité magnétique de la structure 3212 et vue en cours de fouille (cliché C. Leprovost)

La sépulture 3213 (fig. 85) a été reconnue en partie grâce à la présence de mobilier et d'un léger contraste visuel sur sa partie ouest, la seule qui a pu être fouillée (les autres ne présentant pas d'indice de comblement). Des mesures ont été effectuées dans le prolongement de cette sépulture mal délimitée et partiellement traitée : une anomalie cohérente par rapport à la zone fouillée est apparue avec un contraste de $20 \cdot 10^{-5}$ u.S.I. entre l'encaissant et la structure ($40 \cdot 10^{-5}$ u.S.I.).

Sépulture 3096

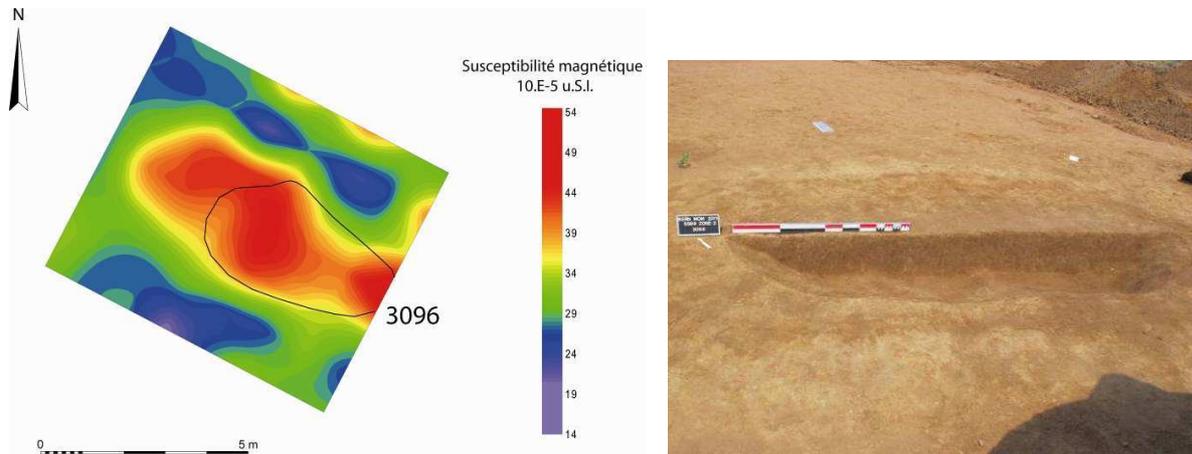


Figure 86 : Carte de susceptibilité magnétique de la structure 3096 et vue en cours de fouille (cliché C. Leprovost)

Cette sépulture a été en partie reconnue visuellement (fig. 86). Les mesures de susceptibilité ont mis en évidence son prolongement sur 2 m vers l'est et la possibilité qu'elle soit en réalité dissociée en 2 structures distinctes. Les observations visuelles et l'absence de matériel n'ont pas permis ici de distinguer ces deux parties lors de la fouille.

Sépulture 3099 et 3100

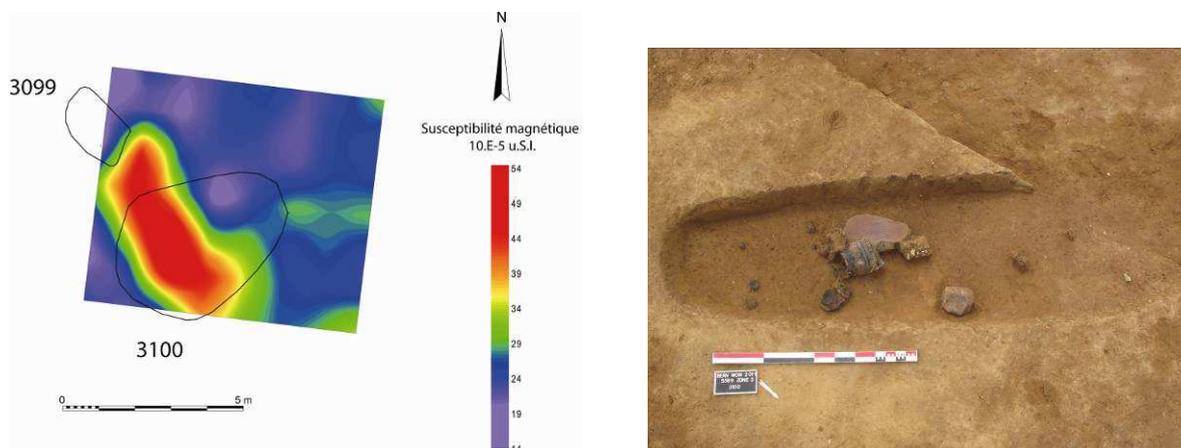


Figure 87 : Carte de susceptibilité magnétique de la structure 3099 et 3100 et vue en cours de fouille (cliché C. Leprovost)

Les mesures effectuées autour de deux indices visuels ont présentées des résultats en contradiction avec les observations de terrains (fig. 87): l'anomalie géophysique, orientée Nord-Ouest Sud-est, relie les deux structures apparues comme distinctes lors du décapage. Deux indices proches ont été interprétés comme deux structures différentes. La fouille a néanmoins confirmé les résultats géophysiques notamment grâce aux nombreux objets découverts.

Sépulture 3022

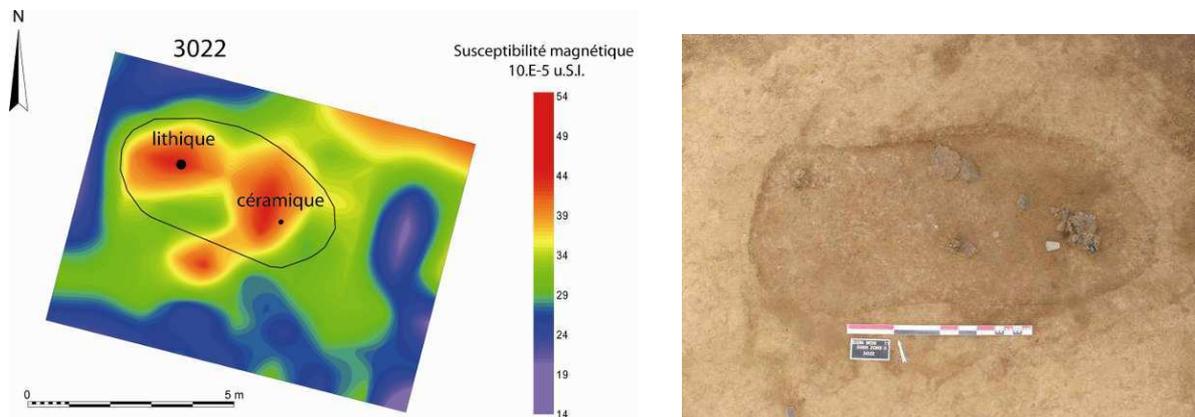


Figure 88 : Carte de susceptibilité magnétique de la structure 3022 et vue en cours de fouille (cliché C. Leprovost)

Cette sépulture a été repérée grâce à de la céramique apparente en surface, à deux endroits distincts qui ont été reliés afin de créer une forme assimilable à une structure (fig. 88). Les mesures de susceptibilité magnétique ont validé cette hypothèse : les valeurs de susceptibilité magnétique forment bien une anomalie de susceptibilité de $40 \cdot 10^{-5}$ u.S.I. dans un substrat de $20 \cdot 10^{-5}$ u.S.I.

Il est fort intéressant de remarquer que les comblements des sépultures présentent des valeurs de susceptibilité quasiment identiques. Ces forts contrastes de susceptibilité magnétique par rapport au substrat auraient entraîné, en tenant compte de l'aimantation visqueuse accumulée sur 5000 ans, des anomalies assez importantes du champ magnétique terrestre. Il aurait été possible de couvrir une surface plus importante afin de cartographier l'ensemble du site. Aucune prospection de grande ampleur n'a cependant été mise en œuvre, car des bermes assez importantes, résultant des difficultés de lecture des structures lors du décapage, auraient contrariées l'acquisition des données. De plus, de nombreux repères - étiquettes associées à des clous susceptibles de bruyter les données) étaient déjà égarés et dissimulés sous la mince couche de colluvionnements recouvrant le terrain.

Sur le site de Bernolsheim la géophysique semble être une alliée solide qui a permis d'une part de dépasser les limites du diagnostic auxquels elle se montre totalement complémentaire mais aussi d'envisager de nouvelles méthodes d'approches sur les structures peu lisibles rencontrées, afin de se donner les moyens de les étudier de façon exhaustives.

5 Les sites de plaines – les terrasses alluviales

5.1 Sainte-Croix-en-Plaine

Un projet géophysique portant sur l'ensemble du territoire de la commune de Sainte-Croix-en-Plaine (fig. 89) fait partie intégrante d'une synthèse sur son occupation aux époques protohistoriques. Les relevés photographiques des prospections aériennes des 20 dernières années laissent entrevoir un fort potentiel archéologique sur ce secteur, ce qui a été confirmé par les opérations d'archéologie préventive qui ont livré au cours des 15 dernières années un nombre important de sites datés du Bronze Final à la Tène. Cette étude apporte un regard nouveau sur les potentialités de la géophysique pour la caractérisation des sites protohistoriques de plaine en Alsace, et permet de réaliser des comparaisons entre les résultats géophysiques, les résultats de fouilles et de diagnostics, les photographies aériennes, les données LIDAR et les cartes anciennes.

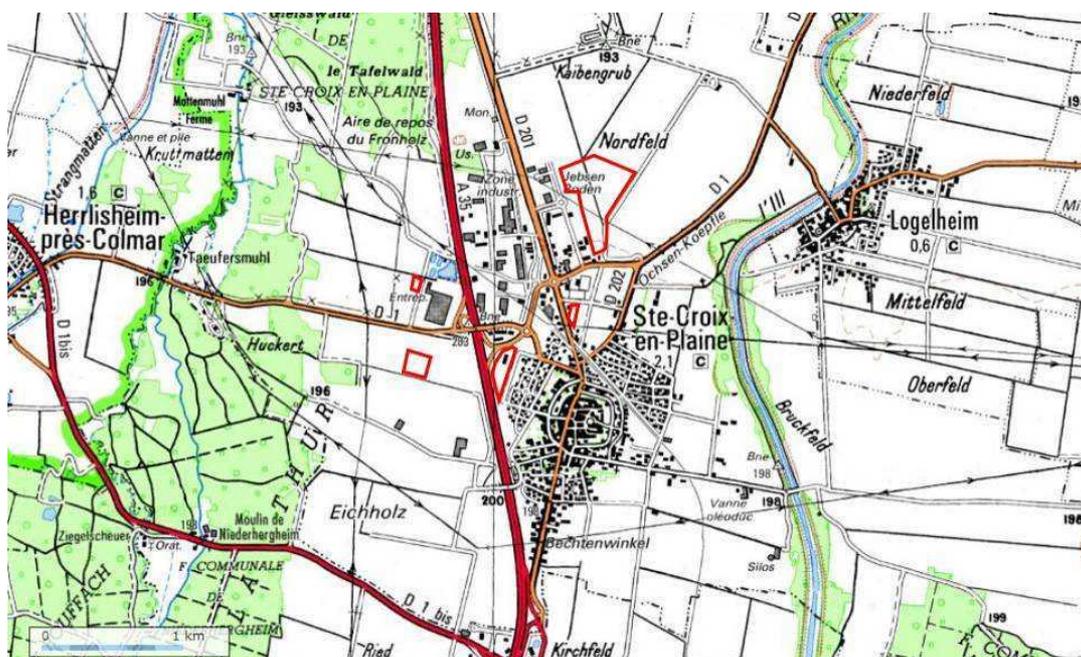


Figure 89 : Carte de localisation des différentes prospections sur la commune de Sainte-Croix-en-Plaine (source IGN). Celles-ci se concentrent essentiellement autour de la zone industrielle Nord.

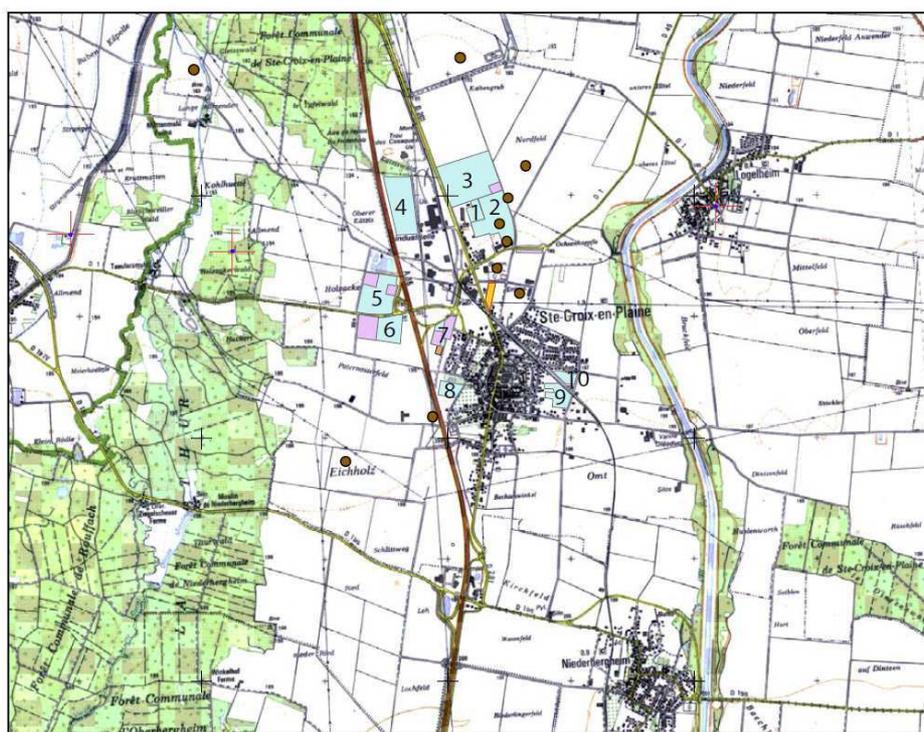
5.1.1 Contexte archéologique

Les environs de l'actuelle commune de Sainte-Croix-en-Plaine sont assez densément occupés de l'Age du Bronze ancien à la Tène finale (Ferrier 2009, Ferrier 2011), ce qui en fait un site potentiellement important (fig. 90). Il existe également des indices d'occupation romaine mais les

quelques vestiges identifiés ici et là sur les différentes opérations de diagnostic ne sont pas comparables à la richesse et à la densité du matériel et des structures protohistoriques.

Dans les années 80 et 90, une série de prospections aériennes a été réalisée sur différentes communes du Haut-Rhin (Zehner *et al.* 1998). Ces prospections ont permis d'identifier plusieurs indices de sites - essentiellement des enclos funéraires circulaires.

Les premiers travaux de reconnaissance occasionnés par le tracé de l'A35 dans les années 80 ont donné lieu à la fouille d'une partie de la nécropole d'Oberesholzackerfeld (Simon 2010). Son prolongement a été récemment traité (Véber 2006), ce qui a permis de préciser sa période de fonctionnement, du Bronze final à la Tène ancienne.



Commune de Sainte-Croix-en-Plaine (Haut-Rhin) - fond IGN (1/25000)

- emprise de l'opération actuelle
- zones diagnostiquées
- zones fouillées
- indices d'occupation repérés en prospection aérienne

Figure 90 : Carte des indices de sites protohistoriques connus par prospections aériennes, diagnostics et fouille archéologiques (Ferrier 2009)

Au nord, sur le lieu-dit *Jebsen Boden* et sur l'emprise de la zone d'activité Mermoz, des diagnostics (Georjon et Croutsch 1999, Kuhnle 1999) ont confirmé les indices archéologiques déjà connus par le biais des photos aériennes et ont mis au jour une nécropole dont l'utilisation s'échelonne du Bronze Final au Hallstatt. La richesse de ses deux ensembles funéraires, distants d'à peine 2 km, la présence d'enclos découverts en photographie aérienne entre ces deux secteurs et leur attribution chronologique, nous poussent à imaginer une occupation continue du nord au sud. Même si cette hypothèse n'est pas vérifiée à ce jour, il faut souligner la proximité de ces deux ensembles funéraires synchrones et remarquables. A proximité de la nécropole d'*Oberesholzackerfeld*, un établissement

identifié en diagnostic se caractérise par des structures d'habitats (fosses, trous de poteau, puits), au lieu-dit *Holzackerfeld* (Zehner 2004, Landolt 2007). A la suite de ces découvertes, un autre secteur d'habitat occupé au Bronze Final et au Hallstatt a été reconnu au lieu-dit *Oberer Kätzis* (Boës 1999). Quelques fosses et fossés de l'âge du Bronze ont également été retrouvés au sud de la commune lors de diagnostics. Il est intéressant de noter que les structures d'habitat sont situées à l'ouest et les structures funéraires à l'est. Aucun élément paléohydrographique ou géomorphologique n'explique à ce jour cette séparation. Les deux systèmes fonctionnent probablement aux mêmes périodes (peut-être de façon discontinue).

5.1.2 Contexte géomorphologique

La commune est située en bordure du domaine alluvial de l'III, sur la basse terrasse rhénane tardiglaciaire qui surplombe le lit majeur du Rhin. Le substrat est composé de dépôts holocènes recouverts par des limons sableux de l'III et des rivières vosgiennes - la Lauch et la Vieille Thur (fig. 91). L'épaisseur des alluvions recouvrant les formations rhénanes varie de 40 à 60 cm. Ce secteur était sujet à des inondations avant les aménagements de l'III qui ont abaissé le toit de la nappe, toujours très proche de la surface (entre 1 et 4 m). A l'Ouest du village, une étude de terrain a permis la mise en évidence de lentilles de matériaux rouge-bruns, caractéristiques des apports vosgiens scellant les alluvions rhénanes et associées à la formation de concrétions calcaires à l'interface des deux dépôts. Les plus grands chenaux sont quant à eux comblés par des sables jaunes, apports alluvionnaires calcaires du massif alpin et de ses contreforts jurassiques.

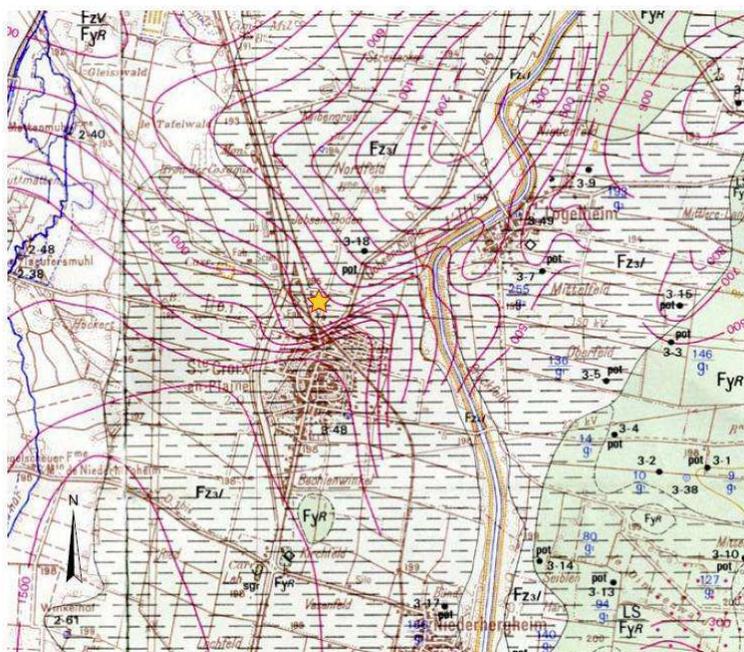


Figure 91 : Carte géologique de Sainte-Croix-en-Plaine (source BRGM), l'ensemble de la commune est recouvert par des alluvions récentes Holocènes (Ferrier 2009)

A plusieurs endroits, des colmatages gris-bleus compacts, argileux et relativement profonds (Ferrier 2009) révèlent d'anciennes zones d'eaux stagnantes antérieures aux périodes d'inondations et de dépôts alluvionnaires. Enfin, sur plusieurs opérations (*OberesKätzis*, *Oberholzackerfeld*), des traces de sols rouges, typiques de ceux rencontrés dans la Hardt, dénotent d'un développement des sols en milieu forestier.

5.1.3 Les sondages électriques

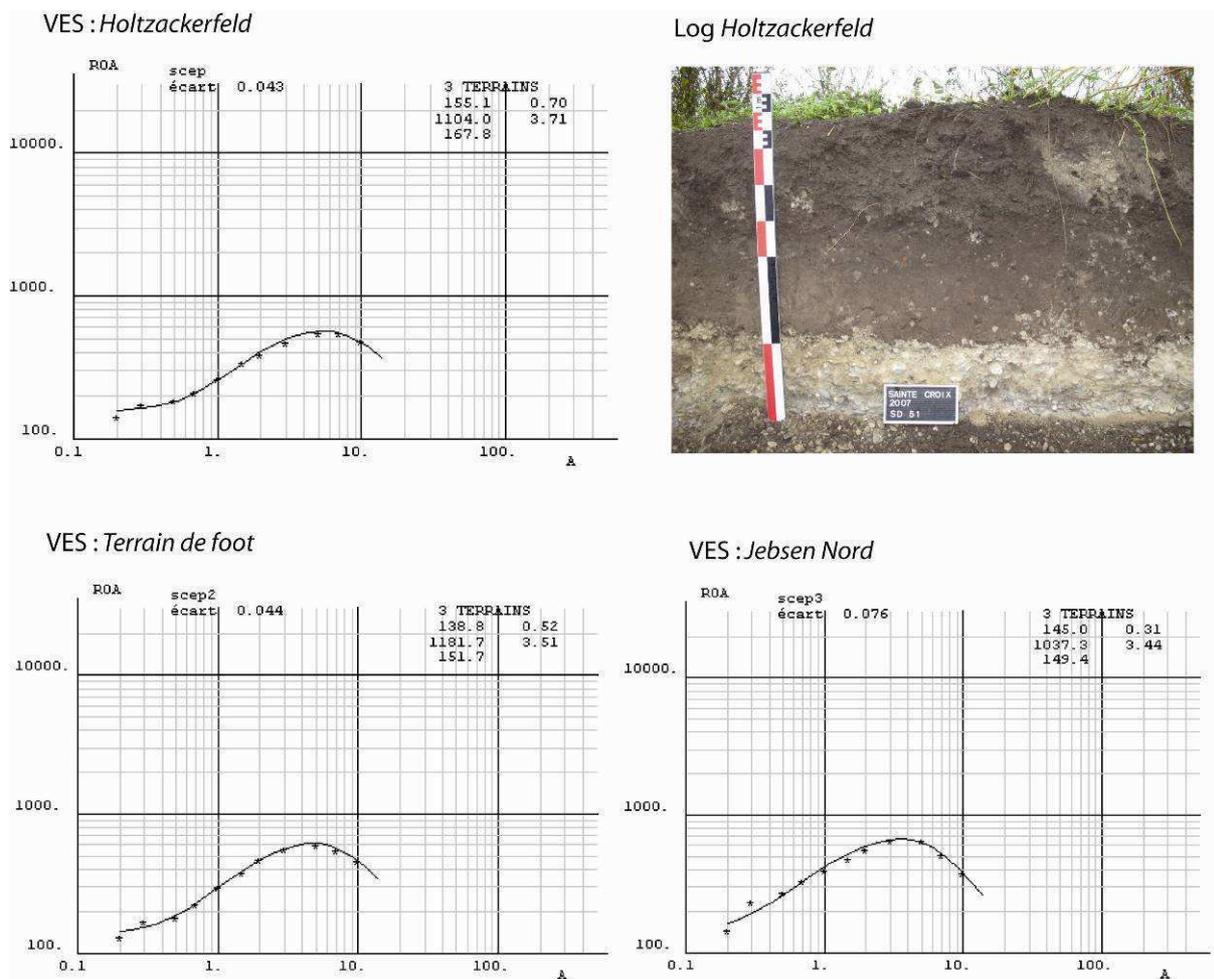


Figure 92 : Sondages électriques verticaux réalisés sur la commune de Sainte-Croix-en-Plaine, les modèles proposés pour l'inversion des données sont quasi-similaires quelque soit l'emplacement du sondage. Seul varie la hauteur du toit de la nappe phréatique. (clichés M. Landolt)

Trois sondages électriques ont été réalisés : un au lieu-dit *Holzackerfeld*, un à proximité du terrain de foot et un dernier au lieu-dit *Jebesen Boden*, dans le but premier de calibrer les mesures du CS60 mais aussi de connaître l'épaisseur du recouvrement (fig. 91). On y remarque un très fort contraste de résistivité entre les niveaux argilo-sableux superficiels (150 ohm.m) déposés au quaternaire et les alluvions rhénanes (1200 ohm.m). L'altération mécanique par les labours se matérialise par une homogénéisation des contrastes électriques du sol dans les horizons superficiels.

On ne peut distinguer dans les niveaux superficiels, l'origine des sédiments (jurassienne et vosgienne), la présence de sols rouges de la Hardt, ou de niveau archéologique protohistorique. Ces sondages nous renseignent parfaitement sur l'épaisseur du recouvrement de limons au-dessus du sable rhénan dans lequel sont creusées la majeure partie des structures. On peut observer sur les trois sondages une chute brutale de la résistivité entre 4 et 5 m, qui signale peut-être le toit de la nappe phréatique : le sable étant gorgé d'eau, la résistivité s'en verrait effectivement largement diminuée.

5.1.4 Les campagnes de prospections aériennes



Figure 93 : Enclos circulaire révélés par photographie aérienne au lieu-dit Jepsen Boden (clichés Jean-Jacques Wolf)

Plusieurs campagnes de prospections aériennes ont été réalisées sur la commune de Sainte-Croix-en-Plaine (Jean-Jacques Wolf, Goguey), mais n'ont malheureusement pas fait l'objet de synthèses complètes. Nous avons repéré approximativement les structures archéologiques grâce aux indices de localisation laissés par les anciens prospecteurs et par la reconnaissance d'un parcellaire qui, malgré le remembrement, a laissé au sol des traces pérennes (fig. 93). Du point de vue critique, ces photographies permettent de sensibiliser les archéologues au potentiel d'une zone mais ne sont d'aucune aide pour évaluer convenablement la nature et le nombre des structures enfouies : seules les structures les mieux conservées sont ici visibles à la surface du sol. Il aurait été préférable de réaliser un travail de localisation précise juste après la prise de vue pour s'assurer que les repères spatiaux au sol n'ont pas bougés, et éviter ainsi les problèmes auxquels nous avons été confrontés pour le redressement des images et la géolocalisation des indices. Les photos réalisées dans les années 90 par les deux prospecteurs ont néanmoins rendu possible la détection de structures peu profondes, dans des champs de blé, à des périodes adéquates (bien connues des prospecteurs : maturation du blé, période de sécheresse, etc.). Aujourd'hui, la monoculture du maïs dans la plaine d'Alsace empêche souvent ce type d'observations et rend cette méthode de prospection obsolète sur un nombre important de

secteurs, comme à Sainte-Croix-en-Plaine. De même, il existe de fortes contraintes quant aux conditions d'observations de ces indices : période de prise de vue, type de cultures au sol, profondeur des structures qui rend l'obtention de résultats positifs quelque peu aléatoire.

5.1.5 La nécropole Jebesen Boden - Nordfeld

5.1.5.1 Validation des outils géophysiques sur des structures funéraires connues

La première phase de l'étude géophysique a porté sur la vérification de la pertinence de la méthode magnétique sur un secteur déjà diagnostiqué entre 1999 et 2001 (fig. 94). Ce diagnostic n'a pas donné suite à une fouille, si ce n'est quelques fenêtres d'évaluations sur une emprise restreinte, dont la plus grande se démarque largement des autres et atteint environ 2500 m². Plusieurs fossés et enclos circulaires y ont été découverts, ainsi que des incinérations.

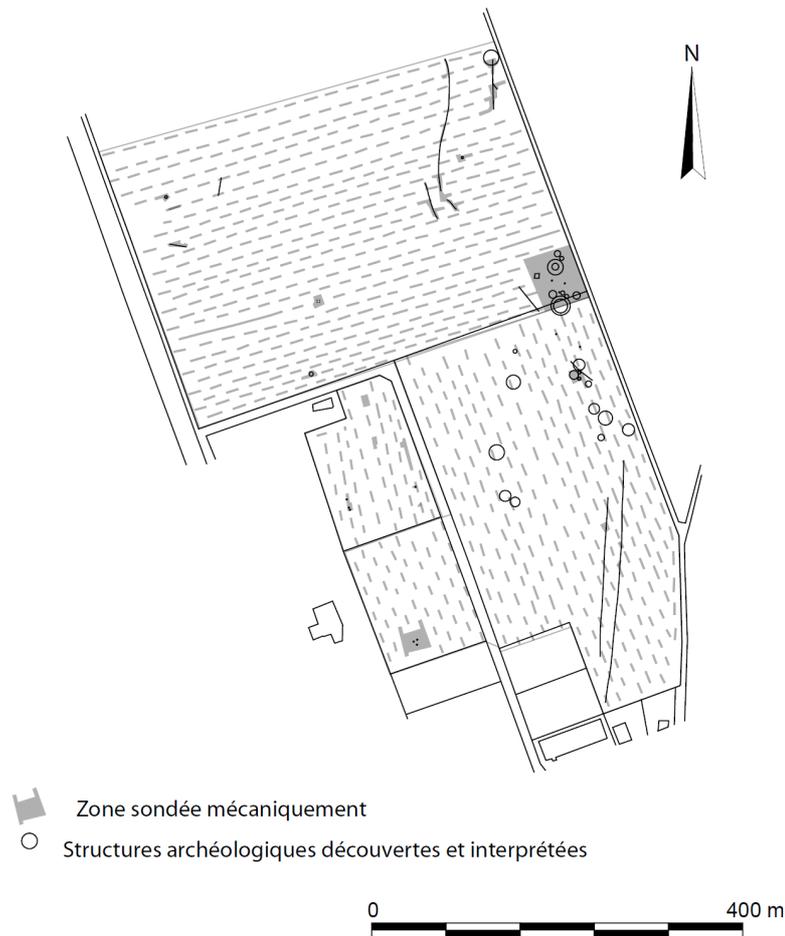


Figure 94 : Relevés des sondages de diagnostic et interprétation des vestiges retrouvés dans les tranchées (d'après Georgeon 1997, Kuhnle 1999 et Jeudy 1999)

5.1.5.2 Diagnostic Nordfeld

Sur la partie nord du diagnostic (Kuhnlé 1999), la prospection géophysique a rendu possible la reconnaissance de l'intégralité de l'enclos funéraire de 20 m de diamètre, seule structure fossoyée circulaire observée lors de l'ouverture des sondages mécaniques, ainsi qu'un second enclos au Sud, en limite de prospection (fig. 95).

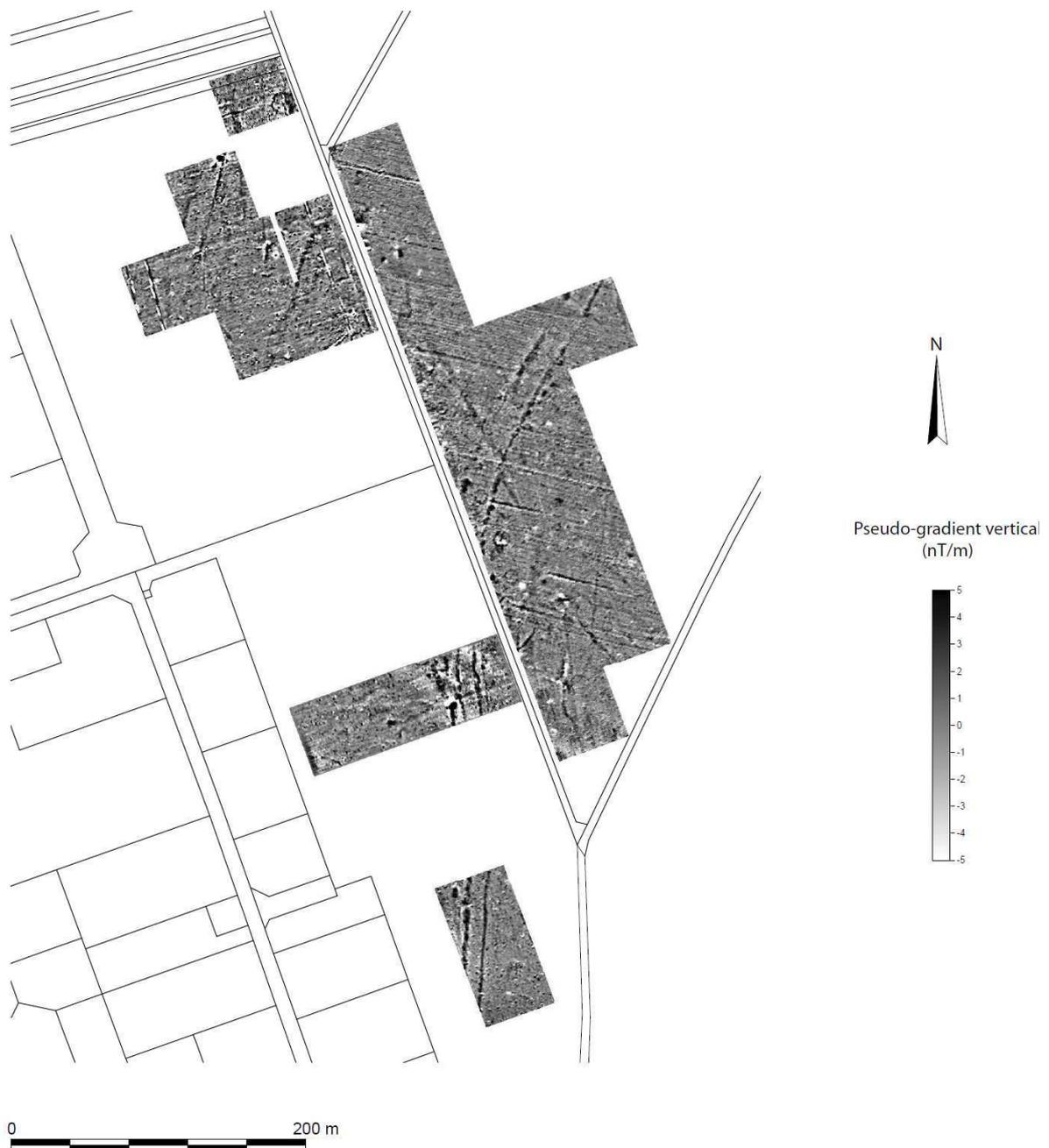
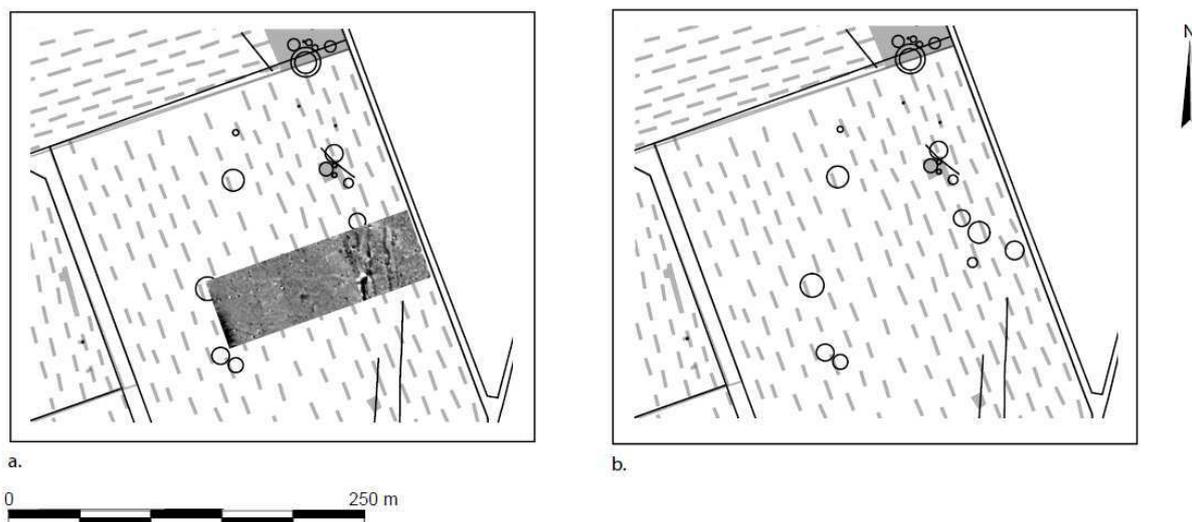


Figure 95 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre sur le lieu-dit *Jebesen Boden*

Seul l'un des deux fossés orientés Nord-Sud découverts lors de l'ouverture par tranchée apparaît sur la carte magnétique au nord de la prospection. Il semble plus rectiligne que celui extrapolé entre les différentes tranchées et, au vu de l'association que l'on peut faire avec une anomalie topographique (LIDAR), est probablement assez récent.

La nette différence de couleur et de texture entre le substrat et les niveaux limoneux superficiels suggère un faible brassage entre les niveaux superficiels et les niveaux géologiques lors de l'ouverture des tranchées. De plus, il doit exister une nette différence de susceptibilité magnétique entre la partie limoneuse, porteuse potentielle du signal, et le niveau gravo-sableux (env. $10 \cdot 10^{-5}$ u.S.I.). De fait, les tranchées de sondage n'apparaissent que très sensiblement sur la carte de prospection car elles ne sont pas associées à des perturbations des niveaux de recouvrement plus magnétique avec le substrat amagnétique.

Des anomalies associées à des fossés actuels (de drainage ?) ressortent très nettement sur la carte d'anomalies magnétiques (env. 10 nT/m), en raison de la microtopographie qu'ils induisent ainsi qu'à une probable augmentation de susceptibilité dans leurs comblements mieux aérés et plus sensibles à l'activité biologique.



Comparaison des plans a. et b.

a. Carte d'anomalie du champ magnétique (blanc/noir : -5/5 nT)

b. Proposition d'interprétation du diagnostic d'après C. Georjon 1997

Figure 96 : Confrontation entre les interprétations et extrapolation des résultats archéologiques et les cartes d'anomalies magnétiques qui remettent en question l'interprétation des fossés comme enclos circulaires (fond G. Kuhnle 1999, C. Georjon 1997)

5.1.5.3 Diagnostic Jebesen Boden

Ce diagnostic a mis au jour plusieurs fossés (Georjon et Croutsch 1999). Leur transect retrouvé au fond des tranchées a été systématiquement extrapolé comme des enclos circulaires, identiques à ceux découverts dans la fenêtre de la partie nord du diagnostic. Les observations de terrains ne font en

réalité état que de bouts de fossé découverts en bordure de tranchées, ce qui n'a probablement pas permis de restituer leurs orientations.

Les prospections géophysiques révèlent quant à elle l'agencement de ces mêmes fossés (fig. 96): sur la zone prospectée, une seule section d'enclos a pu être observée en bordure nord de la prospection, section décalée d'une tranchée à cause d'une probable erreur de positionnement.

Sur les cartes du pseudo-gradient du champ magnétique, on identifie quatre anomalies linéaires continues ou quasi-continues dessinant un double fossé doublé. Les anomalies associées à ces fossés sont assez fortes et orientées dans le champ magnétique. Les deux anomalies linéaires centrales correspondent probablement à des fossés tandis que les anomalies extérieures pourraient n'être que des fosses assez proches les unes des autres. L'une d'entre elles est comblée par un sédiment particulièrement magnétique (céramiques, terre cuite, fer ?) à l'origine de la forte amplitude de l'anomalie (env. 20 nT/m). Cette structure située entre les tranchées de diagnostic n'a pas été repérée lors de l'ouverture. Les fossés n'ont donc été vus que partiellement lors du diagnostic, et mal interprétés. La proximité d'enclos circulaires et les observations en photographie aérienne ont faussé l'objectivité de l'interprétation. Sur ce secteur, la prospection magnétique a donc permis de réinterpréter des données anciennes, d'exclure l'hypothèse des enclos et de montrer très clairement l'existence et la complexité d'un double fossé d'époque indéterminé.

5.1.5.4 Caractérisation de la partie orientale de la nécropole.

Afin de poursuivre l'analyse de la nécropole, une prospection magnétique a été réalisée sur des champs labourés à l'Est des terrains sondés. Sur une surface de 3,75 hectares on a pu repérer la limite orientale de la nécropole, ainsi que plusieurs enclos qui n'avaient jusqu'alors jamais été observés. Le niveau de bruit dû aux éléments en fer en surface est assez faible, l'éloignement de la zone actuellement habitée réduisant le niveau de pollution.

En premier lieu, on remarque la trace des cultures (sillons de labour) et du découpage parcellaire, générée par les variations de l'éloignement entre le sol magnétique et les capteurs.

Le double fossé observé à l'ouest se prolonge vers le nord-nord-est en se simplifiant : les fosses latérales disparaissent alors que le double fossé central se prolonge. Il est ensuite recoupé à plusieurs endroits. Sur de courtes longueurs d'abord, à l'ouest, ces coupures pourraient correspondre à des variations de conservation du fossé probablement très proche de la surface et atteints par les socles de charrues. Des nappes de graviers étaient en effet visibles dans ce secteur dans les niveaux labourés. Sur de plus longues sections, il pourrait y avoir une perte de contraste magnétique entre la structure et l'encaissant. Cette perte peut s'expliquer par une interruption de la structure où par un changement des caractéristiques du substrat modifiant le contraste magnétique entre structure et encaissant.

Plusieurs enclos à proximité immédiate de ceux détectés lors des fouilles ont été reconnus. L'intensité du signal magnétique est très variable pour ces différentes structures. Cette variabilité peut s'expliquer par différentes hypothèses :

- Il pourrait s'agir de structures de tailles variables (leurs profondeurs étant probablement sensiblement les mêmes). La section du fossé associé à un contraste de propriétés magnétiques moyen pourrait être à l'origine de ce phénomène. En effet, les différents enclos observés sur le diagnostic ne présentent pas tous la même taille. Cependant, la largeur et la profondeur des fossés varient peu d'un enclos à l'autre pour un diamètre donné, or ils sont ici quasiment tous identiques.
- Cette variabilité pourrait provenir des différences de niveaux de conservation des enclos. En effet, à plusieurs endroits, on peut observer sur le terrain des remontées de graviers qui sont arraché au substrat gravelo-sableux et ramenés à la surface par les labours.

Si on considère le faible recouvrement du substrat dans lequel sont creusées les structures et la puissance des socles de charrues utilisés aujourd'hui, il est tout à fait envisageable de penser que plusieurs enclos sont abîmés par une érosion mécanique des sols.

Plusieurs anomalies linéaires apparaissent également sur l'emprise de la prospection, avec des orientations différentes de celles observées pour le double fossé. Certaines anomalies sont bien marquées et orientées dans le champ : il pourrait s'agir de fossés, ces derniers ne correspondant pas aux orientations du parcellaire actuel, ils ont sans doute une origine archéologique (dont la fouille pourra préciser la chronologie). D'autres anomalies linéaires apparaissent de façon beaucoup plus sporadique et ténue : leur amplitude est beaucoup moins importante et leur caractère bipolaire est très peu marqué. Elles pourraient coïncider avec la rupture d'une nappe magnétique telle que l'on pourrait l'envisager pour des comblements de paléochenaux.

Plusieurs anomalies ponctuelles sont probablement à rattacher à des fosses, remplies par du matériel plus ou moins magnétique en fonction de leurs amplitude. Il est tentant d'en attribuer certaines à des incinérations, mais le caractère isolé de ces dernières, bien qu'elles soient rendues magnétiques par la présence d'une céramique à 40 cm de profondeur, n'aurait probablement pas permis de les distinguer avec une maille de 1 m entre profils de la prospection. La fosse associée aux incinérations, n'excédant que très rarement 50 cm de diamètre, serait quant à elle impossible à détecter.

5.1.5.5 Etude du double fossé

Le double fossé a permis de vérifier la pertinence d'autres outils que ceux de la prospection magnétique. Deux appareils y ont été mis en œuvre : le CS60 (induction électromagnétique) et le

Syscal Pro (résistivimètre électrique). Le premier pour cartographier la conductivité (fig. 97) et la susceptibilité apparente du sol (fig. 98), le deuxième pour réaliser une pseudo-section de résistivité électrique sur la section des deux fossés.

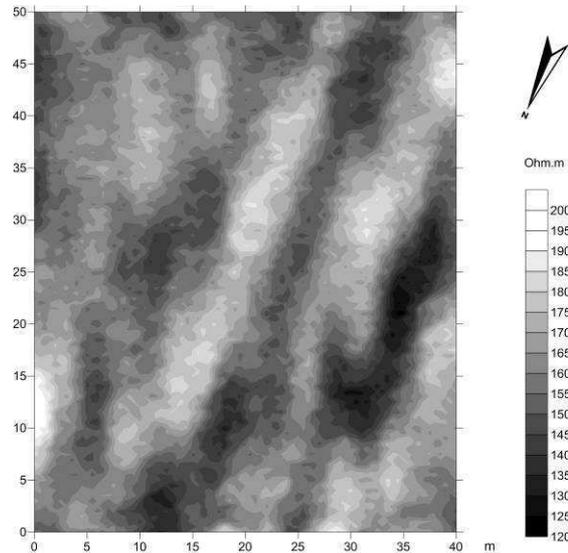


Figure 97 : Carte de conductivité électrique apparente, CS60, configuration VCP, sur le double fossé au lieu-dit Jepsen Boden

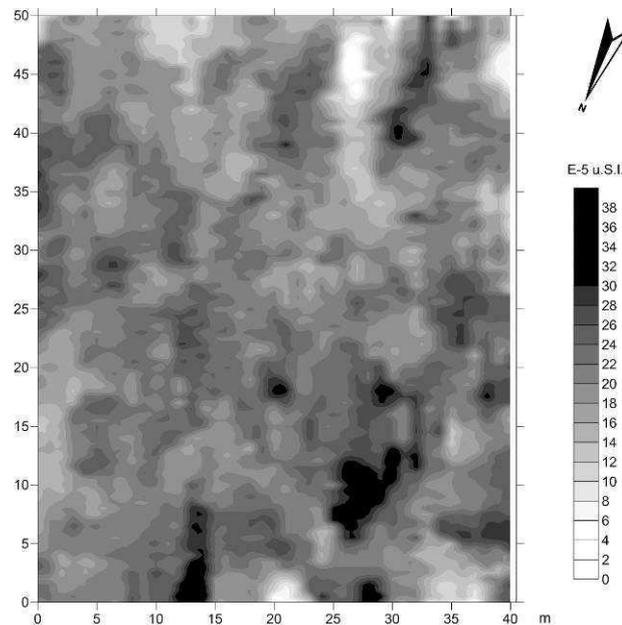
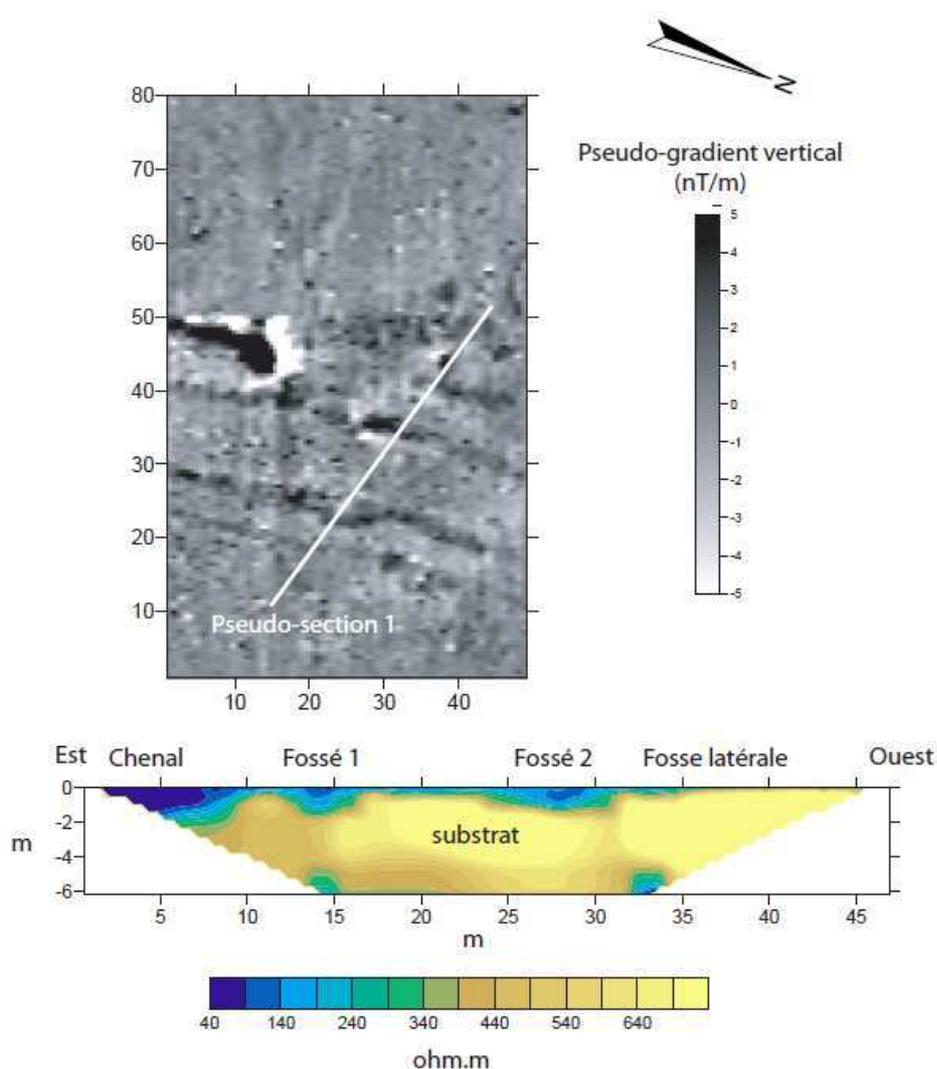


Figure 98 : Carte de susceptibilité magnétique apparente, CS60, configuration VCP, sur le double fossé au lieu-dit Jepsen Boden

Sur la carte de conductivité apparente du CS60 on distingue nettement les deux fossés parallèles qui présentent une plus forte conductivité, en lien avec leur comblement gravelo-limoneux, que le substrat gravelo-sableux. On remarque également des poches plus conductrices à l'est, qui sont dues aux ondulations du toit du substrat qui a piégé des poches de limons plus ou moins étendues. La fosse latérale observée très nettement au nord-ouest de la carte n'est pas visible sur la carte de

conductivité, peut-être à cause d'un creusement moins important dans le substrat ou d'un comblement moins conducteur (majoritairement sables et graviers). La sensibilité limitée des appareils électromagnétiques dans des milieux résistants pour des structures peu conductrices pourrait aussi expliquer en partie ce phénomène.

Sur la carte de susceptibilité magnétique ne figurent que quelques anomalies locales de susceptibilité magnétique, néanmoins localisées sur le tracé des fossés. Celui-ci n'apparaît peut-être partiellement sur la carte qu'en raison de la profondeur d'investigation limitée du CS60 (40 cm en mode VCP) : les éléments visibles seraient soit les mieux conservés dans les 40 premiers cm de sol, perturbé par les labours, soit des éléments magnétiques arrachés par les labours aux fossés plus profonds.



Modèle de résistivité électrique, RMS = 1.61 %, Itération 5, configuration Wenner-Schlumberger

Figure 99 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre et pseudo-section électrique de résistivité sur le système de double fossé au lieu-dit *Jebesen Boden*

La pseudo-section électrique est tout à fait complémentaire à la prospection magnétique car elle nous renseigne sur les propriétés électriques sur le plan vertical (fig. 99). Sur la carte d'anomalies magnétiques on observe nettement deux anomalies linéaires correspondantes au double fossé ainsi qu'une anomalie linéaire plus faible qui le longe à l'est. A l'ouest du double fossé, on observe la présence de fosses suivant la même orientation.

La pseudo-section électrique a également permis de reconnaître le double fossé et d'en observer la section. Sur le double fossé, le fossé le plus à l'ouest présente un profil moins lenticulaire que celui à l'est. Le contraste est relativement important entre le substrat et le comblement du fossé mais beaucoup moins que pour celui des chenaux, ce qui peut être dû à la différence du comblement sédimentaire plus ou moins graveleux. Pour le double fossé, les deux types de données concordent donc parfaitement. La fosse la plus à l'ouest, observée sur la carte magnétique, n'a pas été reconnue en prospection électrique, peut-être en raison de la présence de matériel plus magnétique dans les comblements limoneux des niveaux superficiels, ou de matériaux résistants (graviers) dans les structures du substrat.

L'anomalie linéaire parallèle, au Sud, pourrait en réalité trouver sa source dans la limite entre le chenal et le substrat, visible sur la pseudo-section électrique, mais non sur les cartes magnétiques. Il semblerait en effet que le double fossé longe ce chenal. Celui-ci a peut-être été détourné afin d'éviter une zone potentiellement plus humide que le reste du terrain.

5.1.5.6 Cartographie des principaux paléochenaux

Une carte de conductivité électrique a été réalisée sur l'ensemble des zones étudiées en prospection magnétique afin de cartographier les variations superficielles de conductivité électrique pour repérer d'éventuels paléochenaux et de fournir une explication quant à l'origine de plusieurs anomalies linéaires magnétiques de faibles amplitudes (fig. 100). Malgré une profondeur d'investigation beaucoup plus importante que la profondeur des structures recherchées, des contrastes de conductivité apparente de l'ordre de 10 mS/m sont apparus, révélant un chenal principal orienté nord-sud qui forme une boucle au niveau de la nécropole. Un second chenal présentant des valeurs de conductivité électrique beaucoup plus faibles pourrait signaler un bras secondaire, l'ensemble formant alors un système anastomosé. Les coupures du double fossé linéaire, coïncidentes avec les tracés des chenaux, explique ainsi le faible contraste entre un chenal probablement magnétique et le fossé archéologique. Afin de vérifier la puissance stratigraphique et la section du chenal principal, nous avons réalisé deux pseudo-sections, une au nord et l'autre au niveau du coude.

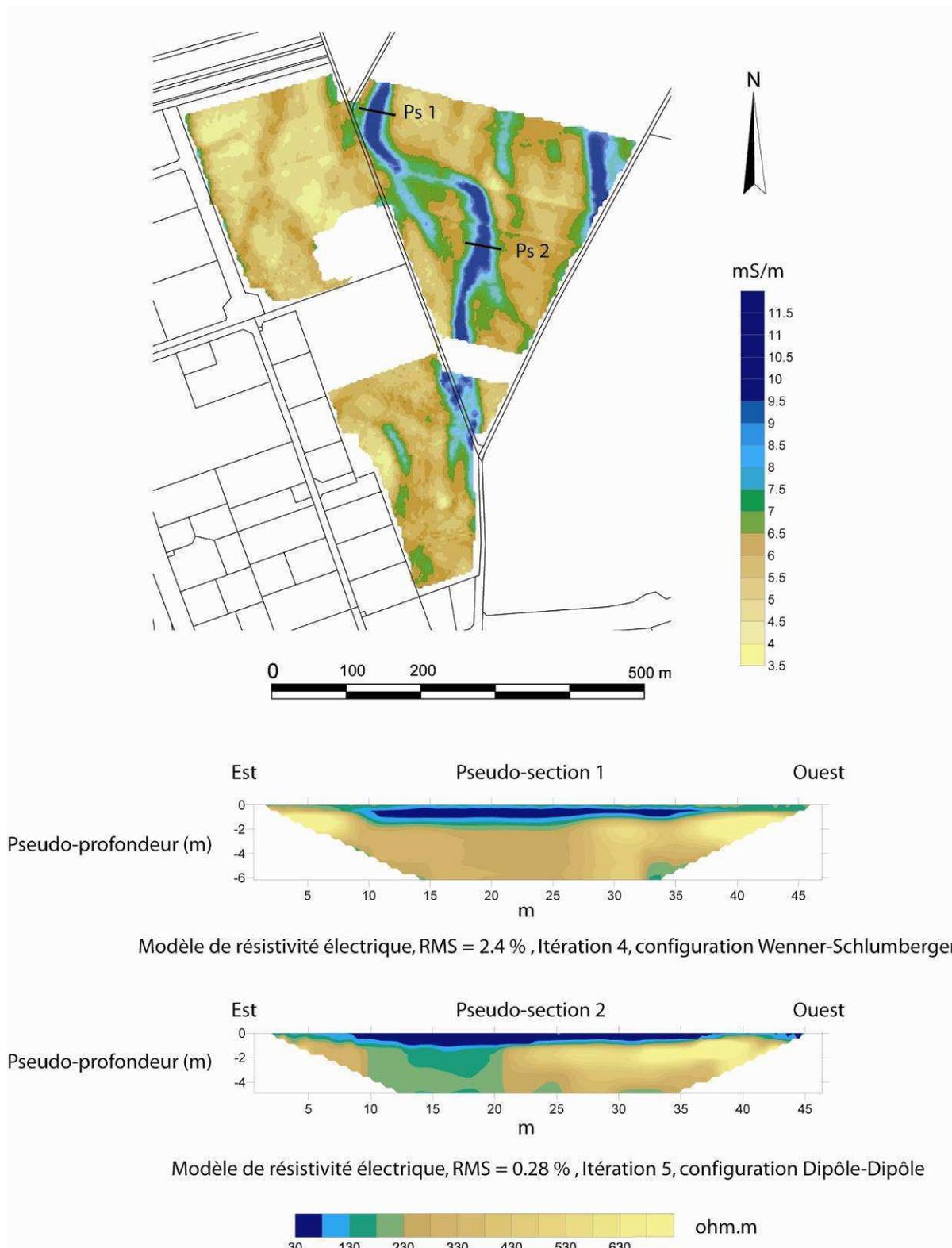


Figure 100 : Carte de conductivité électrique apparente, EM31 – HCP, et pseudo-section électrique sur le principal chenal au lieu-dit *Jebesen Boden*

La pseudo-section au nord est présentée avec la configuration Wenner-Schlumberger et l'autre en Dipôle-dipôle. Les variations entre chaque configuration sont minimales, c'est la pseudo-section la moins bruitée et avec une erreur RMS (moindre carré) de l'inversion la plus faible que nous présentons ici. Au nord, la pseudo-section électrique avec une configuration Wenner-Schlumberger a été réalisée avec un écartement de 50 cm entre chacune des 96 électrodes. On remarque un très fort contraste entre le comblement limoneux du chenal (30 ohm.m), qui contient probablement une part plus importante d'argile, et le substrat gravelo-sableux (500 ohm.m). A cet endroit où le chenal amorce une boucle qui se prolonge au nord, il est légèrement surcreusé sur sa partie externe.

Sur la deuxième pseudo-section, avec la configuration Dipôle-Dipôle, on distingue le chenal avec le même contraste entre l'encaissant et son comblement. Là encore il présente un creusement plus important sur sa partie est, creusement qui ne peut s'expliquer ici par le coude (cette fois-ci dans l'autre direction). Son comblement atteint 2 m de profondeur, ce qui en fait une structure assez importante en comparaison avec les cours d'eau étudiés sur les opérations à proximité. Il pourrait s'agir d'un écoulement préférentiel des eaux d'inondations tel que ceux que l'on peut observer sur les photographies aériennes du secteur. Les pseudo-sections électriques ne permettent cependant pas d'estimer les dynamiques de comblement de ces chenaux situés trop près de la surface et possédant pour les différents niveaux de limons argileux des propriétés électriques trop proches. De plus il est impossible de proposer une datation pour la période de comblement, permettant ainsi de les associer aux autres structures.

5.1.5.7 Interprétation de la nécropole de Jebesen Boden

Les différentes prospections se sont avérées très positives et permettent de proposer un nouveau modèle d'occupation du secteur (fig. 101). Elles ont permis de préciser toute une partie des interprétations élaborées à la suite des diagnostics, où le temps imparti est sans nul doute à l'origine des incohérences proposées et où l'approche statistique avec un échantillonnage classique à 10 % environ, avec des tranchées placées en quinconce, montre ici quelques unes de ses limites.

Tout d'abord, il a été possible d'appréhender une structuration spatiale en dehors de l'emprise du projet d'aménagement, par la reconnaissance de structures archéologiques mais aussi géologiques, étroitement imbriquées. Cette nouvelle analyse spatiale ne constitue bien sûr pas un modèle archéologique complet puisqu'elle ne permet pas de dater les ensembles ou d'établir des vérifications archéologiques et géomorphologiques (études des chenaux, de la dynamique de mise en place des niveaux superficiels, etc.). Elle participe néanmoins à l'élaboration de quelques hypothèses concernant cet espace.

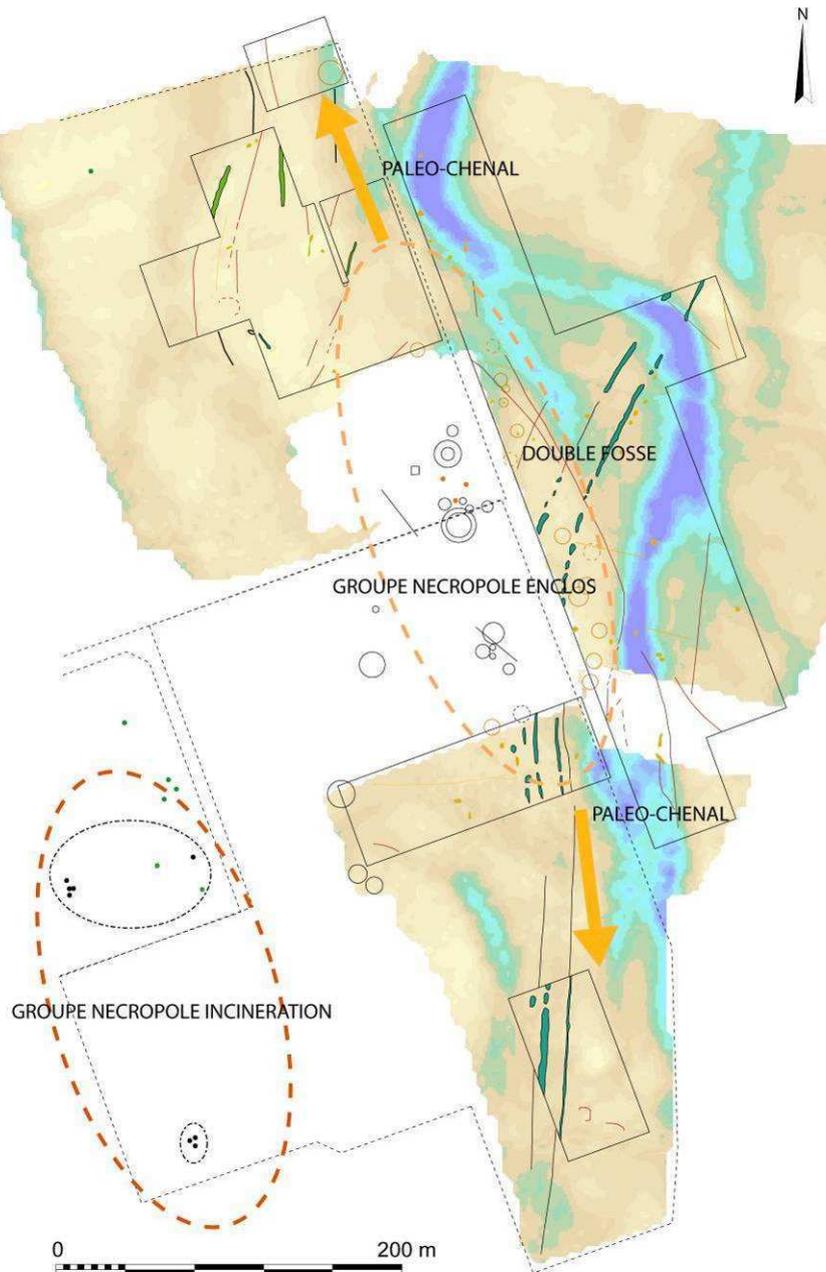


Figure 101 : Interprétation conjointe des données de prospections électriques et des données archéologiques sur le développement de la nécropole de *Jebsen Boden*

D'un point de vue archéologique, le secteur compte un groupe d'incinérations isolées à l'ouest et des enclos funéraires à l'est. C'est sur ce deuxième ensemble, encore préservé d'un aménagement galopant, que s'est concentrée l'analyse. L'idée d'une structuration de l'espace dans la longue durée s'impose : le double fossé pourrait faire le lien entre l'ensemble protohistorique et le parcellaire actuel.

Les enclos, dont une dizaine en plus de ceux déjà connus, ont pu être repérés dans la partie orientale, s'organisent suivant un axe nord-sud. La limite de cet ensemble concorde avec les paléochenaux, révélateurs d'une zone épisodiquement plus humide et peut-être évitée pour

l'implantation de structures funéraires. Il faudrait poursuivre les prospections à l'est pour voir si d'autres structures existent. Des enclos isolés sont situés au nord et au sud de l'ensemble funéraire (celui au sud, connu par d'anciennes prospections aériennes, est actuellement sous un bâtiment). Le double fossé prend au sud la direction des enclos repérés dans cette partie du village, alors qu'au nord-ouest il vient couper les deux chenaux pour s'orienter selon le parcellaire actuel. On peut donc considérer la persistance d'une organisation jusqu'à nos jours. Bien sûr, il est impossible à partir de ces données de fournir une explication quant à la chronologie et les relations entre ces différents ensembles : il faudrait pour cela fouiller le secteur où le double fossé vient couper le groupe d'enclos en bordure du paléochenal.

Grâce à l'outil géophysique, on est néanmoins passé d'une reconnaissance archéologique sommaire – axée sur des problèmes de densité de structures, d'organisation basique entre les structures majeures et de densité de vestiges – à l'échelle de l'emprise des projets d'aménagements, à des éléments de compréhension d'organisation spatiale dans la longue durée et sur une plus grande étendue.

5.1.6 La nécropole Oberesholzackerfeld

Malgré l'étendue des vestiges sur la commune de Sainte-Croix-en-Plaine et l'existence de multiples enclos funéraires, seule une nécropole a été étudiée de façon précise, d'abord à la suite du projet autoroutier de l'A35 par Thévenin entre 1979 et 1981, puis par Véber en préalable à l'aménagement d'un lotissement. Une prospection géophysique a été réalisée entre le lotissement et l'autoroute à l'est (qui borde également la fouille du site d'habitat Holzackerfeld), ainsi qu'au sud du rond-point, sur la seule parcelle encore accessible.

Plusieurs enclos avaient été partiellement fouillés par Thévenin, qui avait pu repérer ces vestiges lors de prospections aériennes dans le cadre d'une étude d'impact du projet autoroutier de l'A35, à une époque où la réalisation de diagnostics n'était pas encore systématique et où les pratiques agricoles, plutôt axées vers la culture du blé, permettaient d'envisager des campagnes de prospections aériennes fructueuses. Les mesures ont révélé d'autres structures potentielles qui pourraient signaler une aire d'extension de la nécropole d'*Oberes Holzackerfeld*, tout du moins sur la partie sud du site. La prospection a mis au jour des structures à l'ouest jusqu'à l'autoroute.

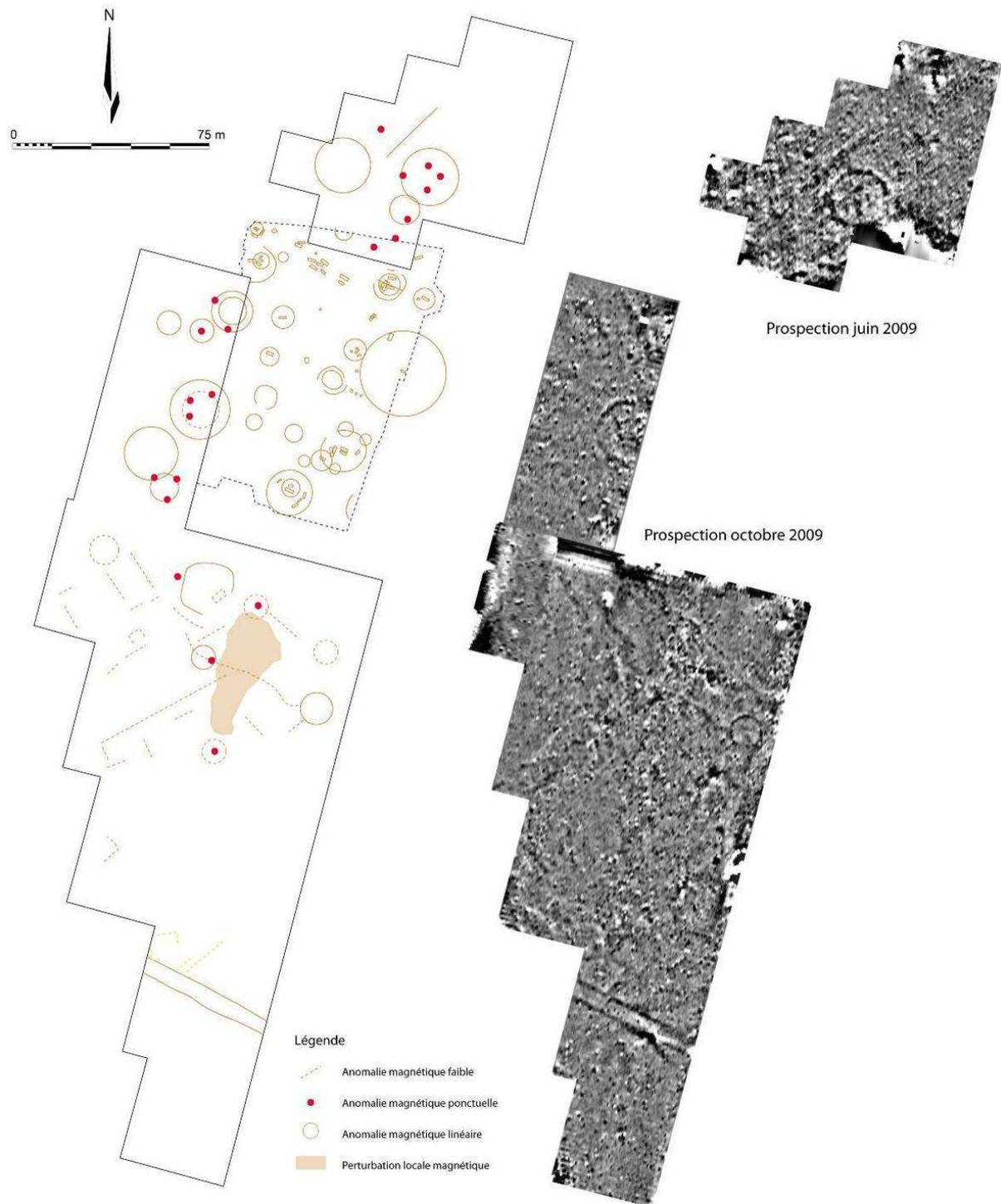


Figure 102 : Carte des anomalies du champ magnétique terrestre (-3/3 nT/m) et interprétation archéologique de l'extension de la nécropole Oberes Holzackerfeld (d'après C. Véber 2006)

L'intérêt de cette étude est de pouvoir comparer les résultats avec ceux de la fouille récente pour une analyse précise des structures funéraires (fig. 102), tant des enclos que des sépultures ou des incinérations. Les résultats de la prospection ont été perturbés par l'existence d'un grillage métallique entourant l'actuel lotissement qui modifie le signal magnétique autour des structures et sur les terrains environnants. Le sens des profils, parallèles sur la partie ouest à ce grillage perpendiculaire dans la

partie sud permet de mieux modéliser son influence à l'échelle d'un profil et donc de le traiter, ce qui n'est pas le cas dans la partie sud-ouest en bordure du lotissement.

Les perturbations, métalliques et de surface, sont nombreuses. Elles proviennent des premières fouilles d'A. Thévenin, du diagnostic de F. Schneikert et enfin de la construction du lotissement et des pollutions erratiques actuelles. Le faible recouvrement des vestiges creusés dans le substrat gravo-sableux est au contraire un avantage.

Le comblement naturel des structures donne des contrastes de susceptibilité moyens. Un niveau de bruit (hors grillage métallique) plus important aurait empêché la lecture de nombreuses anomalies sur cette zone. De fait, la carte a un caractère bruitée, qui découle du faible rapport signal sur bruit entre les anomalies d'origine archéologique et le bruit de surface.

Le secteur nord étant actuellement en terrain vague, le niveau de bruit y est plus élevé : une canalisation proche de la route y entraîne une très forte anomalie et empêche l'observation d'autres structures.

L'analyse des données a été largement orientée par les résultats de la fouille et du diagnostic. Au nord de l'emprise, on distingue très nettement un enclos funéraire tandis que deux autres apparaissent de façon beaucoup plus ténue. La différence de contrastes peut s'expliquer par la section de ces enclos, coupés lors du diagnostic : 1,3 à 1,6 m de largeur pour l'enclos 1, alors que les enclos moins visibles ont des largeurs de 0,65 à 1,1 m et de 0,9 à 1,1 m, limite des dimensions nécessaires pour qu'une structure soit détectable avec ce type de comblement, si on exclut la puissance du recouvrement qui ne rentre pas en jeu ici. Plusieurs anomalies ponctuelles de fortes amplitudes peuvent indiquer la présence d'objets magnétiques (terre cuite, éléments métalliques).

Entre l'autoroute et le lotissement ont ainsi été repérés sept enclos, ensemble dont on peut imaginer la prolongation sous l'autoroute. Les structures les plus proches de celle-ci ont été dissimulées par l'influence préminente du grillage métallique qui borde l'autoroute.

Au Sud du lotissement, la concentration de structures devient beaucoup plus ténue. Six enclos sont répartis sur toute la largeur de la prospection jusqu'à 80 m au Sud de la fouille. Leurs dimensions sont plus petites que celles des structures observées à l'ouest et au nord. Un enclos de 10 m de diamètre avait déjà été repéré en prospection aérienne dans ce secteur.

Plusieurs enclos localisés en bordure du lotissement par la prospection avaient déjà été identifiés en fouille. Notons que l'amplitude des anomalies magnétiques générées par ces structures est très faible et que plusieurs d'entre elles sont potentiellement des anomalies géologiques ou un effet d'interpolation des points de mesures. Seuls sont à prendre en compte avec certitude ceux dont la signature magnétique est significative ($>3nT$). La fouille a cependant mis au jour de nombreux enclos de faible diamètre avec des largeurs de fossés relativement restreintes. Il n'est donc pas impossible que ces traces assez légères correspondent à des structures funéraires.

Enfin, plusieurs anomalies locales – éléments magnétiques contenus dans les sépultures ou comblements plus magnétiques – s'organisent plus ou moins avec les enclos. Le niveau de bruit

observé à ce niveau de lecture recommande évidemment de considérer ces interprétations avec prudence. Cette hypothèse de travail sur l'extension de la nécropole n'est bien sûr valable que si cette dernière est organisée de façon homogène avec des enclos sur la totalité de son emprise. Si on trouvait, par exemple, des incinérations au sud, il est évident que la prospection magnétique ne serait pas capable d'appréhender son extension méridionale. Elle permet cependant d'aller plus loin que la prospection aérienne, inopérante pour l'évaluation de la densité des vestiges sur cette partie du site.

La prospection a également révélé un double fossé orienté nord-ouest sud-est. La largeur entre les fossés est beaucoup plus restreinte que pour le double fossé du lieu-dit Jebsen Boden, mais l'anomalie est assez forte. Plusieurs autres structures linéaires présentent un signal magnétique assez faible, et s'orientent suivant deux directions, perpendiculaires les unes aux autres. Certaines d'entre elles pourraient correspondre à des paléochenaux.

5.1.6.1 Essai sur la nécropole Rittplatz : Y-a-t-il une nécropole continue entre Rittplatz et Oberes Holzackerfeld ?

Lors des campagnes de prospections aériennes, plusieurs enclos ont été repérés sur un terrain militaire au lieu-dit *Rittplatz*. Sur ce grand espace dépourvu de limite parcellaire, il est impossible de rectifier les photos aériennes obliques prises il y a trente ans. La géophysique n'y a pas été mise en œuvre pour des raisons administratives mais aussi pratiques, puisque ce terrain militaire est le lieu de nombreuses manœuvres qui peuvent entraîner un fort bruit en surface, causé par des éléments en fer.

Les récents relevés de photographies aériennes de *Google Earth*, durant une période de l'année relativement sèche, aux prémices de la maturation des plantes, ont mis en évidence deux des cinq enclos repérés par prospection aérienne. Ces images permettent donc de redresser les anciennes photographies et de proposer un nouveau plan de la nécropole. On dispose également des données topographiques du fond LIDAR, qui après traitement ont révélé de nombreux chenaux, un ancien parcellaire et plusieurs anomalies topographiques (fig. 103).

La fonction militaire de ce terrain l'a protégé de l'érosion agricole et a conservé beaucoup plus fidèlement qu'ailleurs les traces des microreliefs, situées aux emplacements même des cercles funéraires, ce qui signale l'existence de tertres.

Cet exemple particulier montre l'intérêt d'autres méthodes de prospection qui, bien que peu efficaces sur le reste de la commune, ont permis avec différentes couches d'informations d'identifier cet ensemble funéraire qui fait de Jebsen Boden un point à équidistance entre les nécropoles d'*Oberes Holzackerfeld* et de *Rittplatz*.

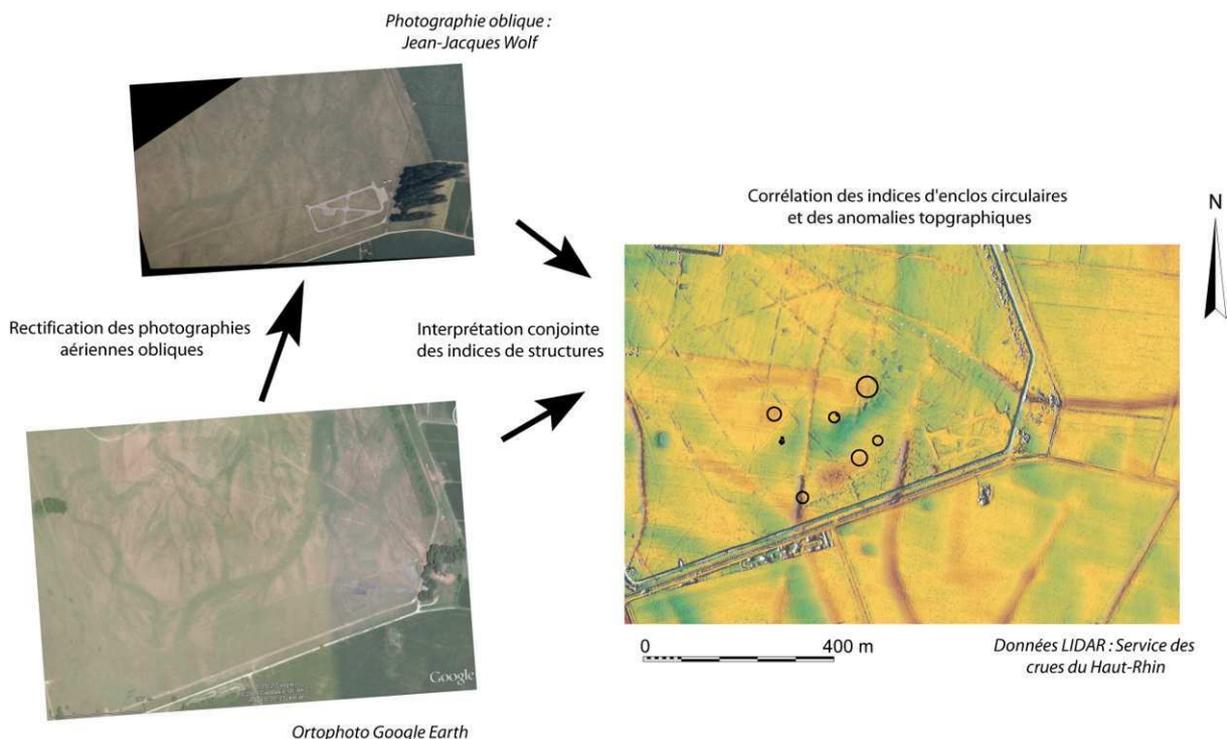


Figure 103 : Interprétation conjointe des anomalies de topographies et des indices de sites de photographies aériennes. Sur l'image Google Earth on devine la formation de chenaux dus aux écoulements préférentiels lors du retrait des eaux d'inondations (traitement LIDAR et redressement photo : F. Basoge)

5.1.6.2 La zone d'habitat Holzackerfeld

L'objectif du projet étant la caractérisation des vestiges protohistoriques, occupations domestiques comme zones funéraires, deux prospections géophysiques ont été entreprises autour des sites d'habitat fouillés par Zehner (Zehner 2004) et M. Landolt (étude en cours).

Les structures de ces sites étudiés durant les six dernières années sont des plus courantes : fosses, fossés, et essentiellement trous de poteaux. Cet établissement paraissait donc tout à fait pertinent pour étudier les limites de la prospection géophysique sur des sites d'habitats protohistoriques, généralement composés d'un bon nombre de structures excavées de petite taille.

Le premier test a été réalisé sur le diagnostic *Holzackerfeld* dans la deuxième partie du projet. La première tranche a été fouillée au courant 2008. Les dépôts récents de rejets agricoles et les fortes perturbations des niveaux superficiels entraînées par le diagnostic n'ont pas fourni de résultats exploitables sur les 3600 m² étudiés.

Une prospection magnétique au Sud de l'emprise, sur une surface de 3,75 ha, a donc été privilégiée (fig. 104), permettant la mise au jour d'une série de paléochenaux présentant des contrastes de susceptibilité magnétique avec l'encaissant plus importants que ceux observés à Jebesen Boden. Ces chenaux ont donc pu masquer une partie des anomalies potentiellement générées par les structures.

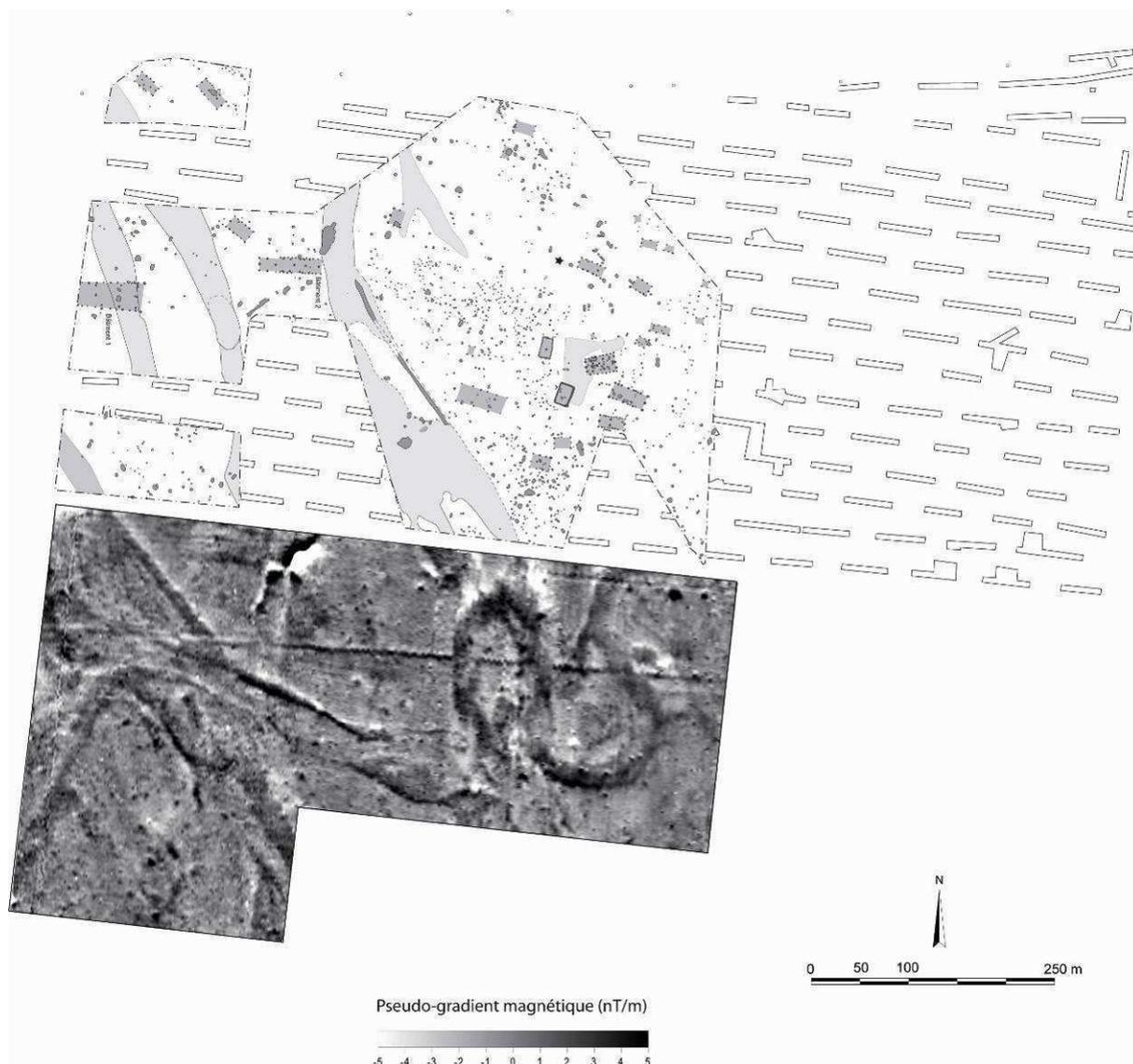


Figure 104 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre au sud de la fouille du Holzackerfeld (fond M. Landolt)

Sans a priori, il est très difficile d'interpréter cette carte parce qu'on n'y distingue que les structures les plus importantes de type fosses et fossés et que le signal géologique des chenaux est important (fig. 105). Aucune anomalie de très petite taille n'a été détectée. La méthode magnétique n'est donc ici pas à même de retrouver des alignements de trous de poteaux comme ceux de la fouille au nord. Il n'est pas nécessaire de préciser que l'existence et la détection d'autres éléments structuraux auraient été nécessaires à la proposition d'hypothèses sur des plans de bâtiments. Cependant l'usage du champ total a permis de repérer de petites nappes magnétiques formant des petits ensembles de structures de forme et de taille proches des fosses exhumées au cours de la fouille. La dimension de ces nappes n'est pas sans évoquer celle des bâtiments retrouvés au nord. L'interprétation archéologique des anomalies magnétiques de moyennes amplitudes et de formes peu typées doit cependant être abordée avec prudence : il pourrait s'agir de creusements naturels remplis avec des

sédiments magnétiques venant de la surface, dont de nombreux exemples ont été retrouvés sur la fouille.

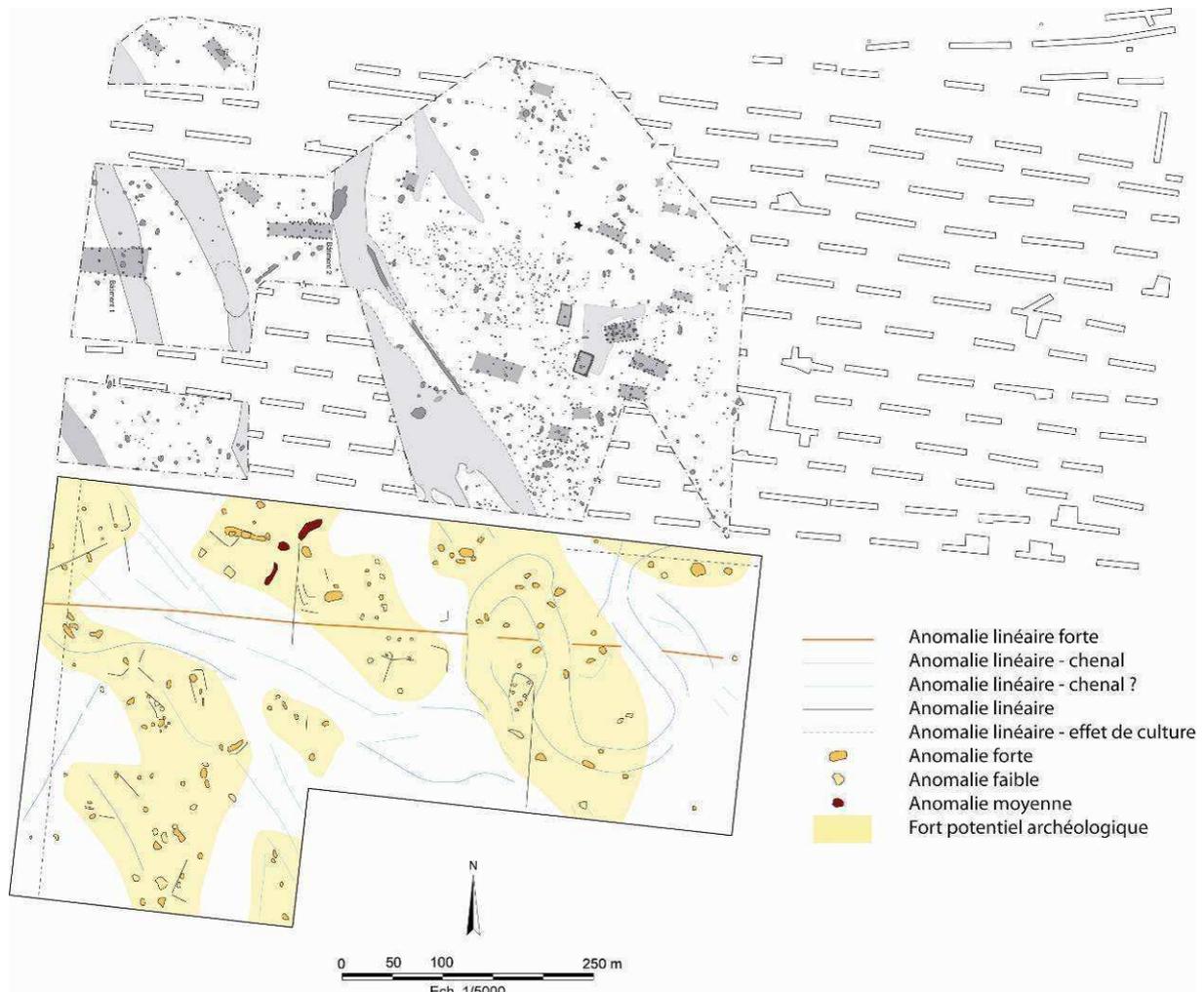


Figure 105 : Interprétation des anomalies du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre au sud de la fouille du Holzackerfeld (fond M. Landolt)

Aucune structuration spatiale de l'habitat à l'échelle du site n'a pu être observée comme ce fut le cas pour l'organisation spatiale des vestiges découverts sur le site d'Holzackerfeld. On remarque tout de même l'anomalie linéaire forte, correspondant probablement à un fossé, ainsi que certains chenaux qui présentent des tracés particulièrement rectilignes sans ressemblance avec ceux de chenaux observés ailleurs. Afin de fournir des indices au futur archéologue en charge du diagnostic, des aires de plus fortes perturbations magnétiques ont été mises en évidence sur le plan. Ces dernières présentent une densité d'anomalies particulière, dont des petites anomalies qui peuvent être sujettes à diverses interprétations.

Au vu des résultats géophysiques, il semble légitime de proposer une extension de la zone d'habitat vers le sud. Le prochain diagnostic permettra de préciser la nature des vestiges. La combinaison de ces différents résultats géophysiques et archéologiques permettra de donner très clairement une organisation spatiale.

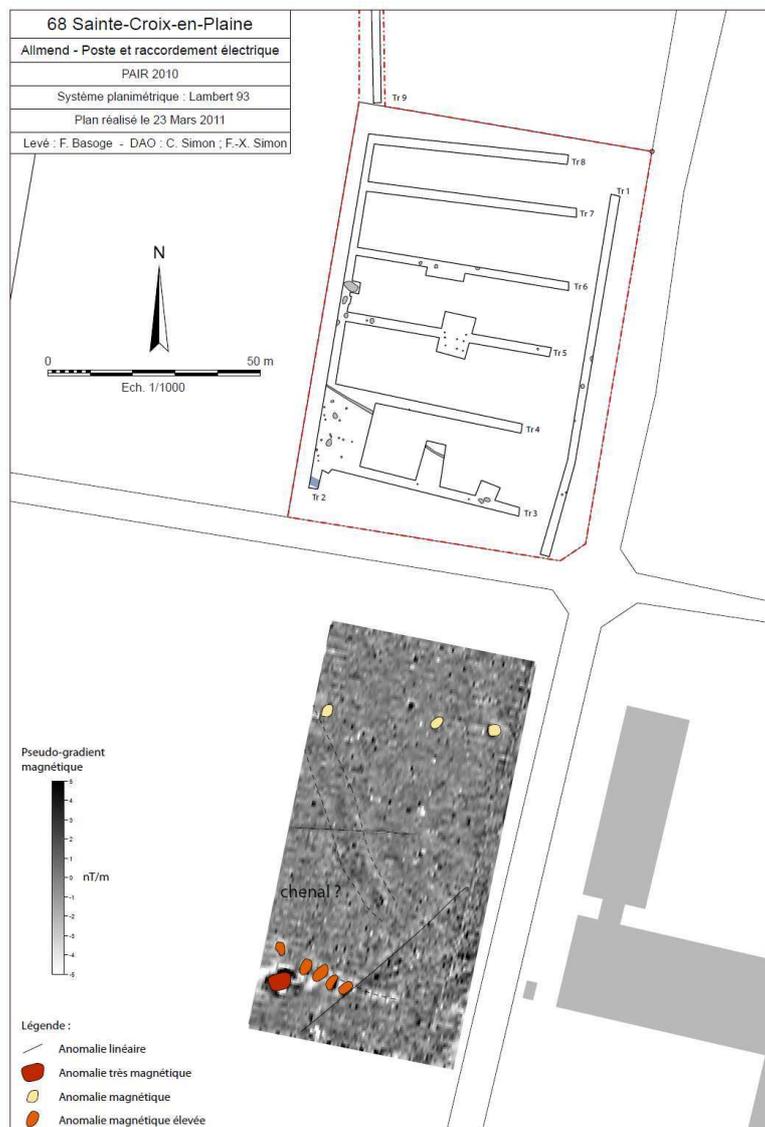


Figure 106 : Carte du pseudo-gradient magnétique vertical au sud du diagnostic *Allmend Poste et raccordement électrique* et interprétation des anomalies magnétiques (fond A. Ferrier)

Un carré de prospection a également été réalisé durant la même période hivernale sur les labours à l'ouest de la fouille de Holzackerfeld-Aldi (fig. 106), pour identifier une éventuelle extension des îlots d'habitat de l'âge du Bronze détectés en diagnostic. Peu d'éléments apparaissent sur cette carte : des anomalies linéaires de faible amplitude dont les tracés pourraient correspondre à des chenaux ; deux fossés de faible amplitude. L'élément le plus intéressant sur cette partie de la prospection est une série d'anomalies au sud (de l'ordre de 15 nT/m : soit un signal assez important).

Leur alignement suggère des structures de combustions associées les unes aux autres. Il pourrait s'agir de fosses à galets chauffés telles celles de l'âge du Bronze retrouvées en batterie sur d'autres fouilles (Rougier 2001).

L'intérêt de l'étude géophysique du territoire de Sainte-Croix-en-Plaine a été de pouvoir déterminer le degré d'information que l'on pouvait espérer tirer de ce type d'outils dans ce contexte particulier. En effet, le caractère alluvial du contexte géologique sur l'ensemble de la commune permet de bien comparer les différents types de structures pouvant être détectées et de comprendre les interactions qui existent entre celles-ci et les chenaux. L'existence de zones d'habitats et de zones funéraires a aussi permis une confrontation directe de l'information pour deux types d'études qui se distinguent par les méthodologies archéologiques mises en œuvre. Enfin l'intérêt de ce travail réside essentiellement dans la réflexion menée quant à une approche à l'échelle, d'une zone d'aménagement actuel, et surtout d'un territoire archéologique. Ce qui permet de proposer un modèle d'occupation certes sommaire mais qui permet de donner une cohérence aux données archéologiques isolées.

5.2 Ensisheim – Liaison routière RD310 A35 – ZAID –

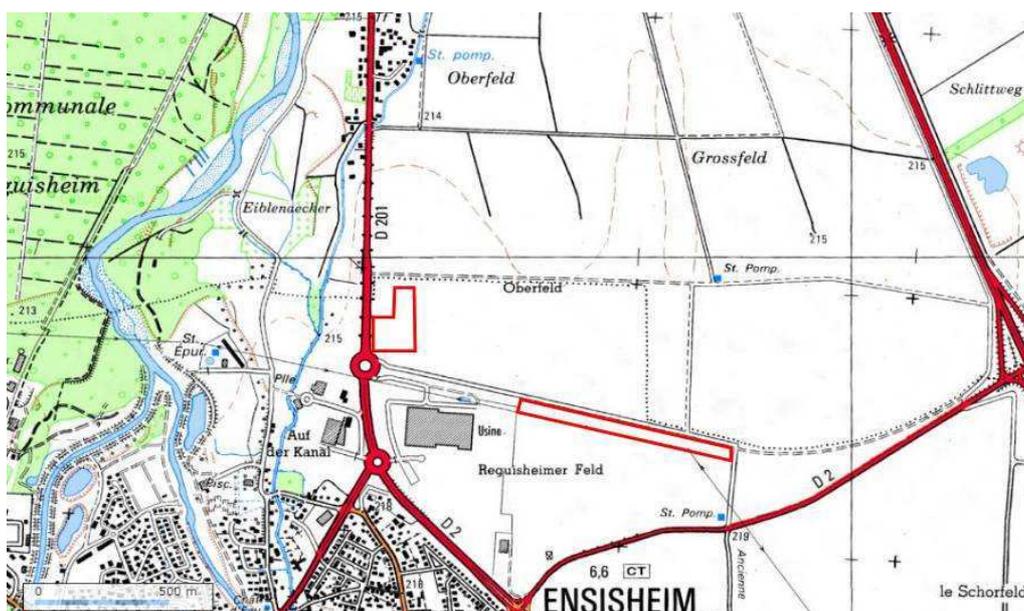


Figure 107 : Carte de localisation de l'étude d'Ensisheim (source IGN)

L'étude a été réalisée dans le cadre du diagnostic de la liaison RD201- A35 et sur le projet de la ZAID au nord de l'actuelle usine THK pour aider l'étude du diagnostic sur un secteur riche en vestiges archéologiques (fig. 107).

5.2.1 Contexte géomorphologique

La commune d'Ensisheim est située à la confluence de la Thur et de l'Ill, rivières qui incisent les formations gravelo-sableuses tardiglaciaire, homogènes et meubles. A l'ouest, une terrasse de graviers sépare les communes d'Ensisheim et de Réguisheim (Ferrier 2010a).

Les relevés LIDAR ont permis de définir différents ensembles liés à cette terrasse et aux cours successifs de l'Ill (fig. 108).

- L'actuel lit majeur dans lequel circule actuellement la rivière et au bord duquel est installée la commune.
- L'ancien lit majeur dans lequel les observations de terrains font état d'une forte activité fluviatile qui a creusé la terrasse, entraînant des dépôts limono-sableux compacts sur plusieurs mètres et où quelques tâches d'oxydo-réduction trahissent les variations de la nappe phréatique. Ces chenaux, sans doute actifs jusqu'à une période récente, présentent une morphologie fluviatile en tresses et semblent être en connexion avec le cours actuel de l'Ill. Cette activité a fortement remanié la formation gravelo-sableuse sous-jacente.
- La terrasse, à l'est, semble épargnée par cette activité fluviatile. Le bombement central pourrait être causé par des diapirs de sel (à une profondeur de 200 m sur la zone centrale de la terrasse et plongeant jusqu'à 500 m en limite). A l'ouest on observe en bordure des loess jaunâtres remaniés qui correspondent à des dépôts lœssiques pléistocènes entraînés par solifluxion (Vigreux).



Figure 108 : Données micro-topographiques LIDAR avec les interprétations structurelles géomorphologiques (Données : Service de crues du Haut-Rhin, traitement des données F. Basoge). Les creusements superficiels sur la terrasse sont le produit des écoulements préférentiels des eaux d'inondations alors que dans le lit majeur les creusements sont dus aux paléochenaux.

5.2.2 Contexte archéologique

L'occupation archéologique d'Ensisheim se concentre sur la terrasse de graviers à l'est de la commune (Ferrier 2010a). Elle s'étend de façon quasi continue du Néolithique au premier Moyen-âge. Des structures d'habitat et des fosses d'extraction, implantées sur les buttes de loess au sud de la commune, sont datées du Rubané, tout comme une nécropole où on a pu dénombrer 45 sépultures. Pour le Néolithique moyen on compte un atelier d'aphanite (ébauches de haches, etc.) au lieu-dit *Reguisheimerfeld*. Des fossés, des fosses et un habitat sous l'échangeur de l'A35 (aménagements de sols en galets) illustrent la transition Néolithique final/Bronze ancien. Quelques urnes draguées au fond de l'III et une nécropole à incinérations documentent la période du Bronze Moyen et Final. Le site de THK où l'on a découvert une série de fosses est occupé dès le Bronze final, avec des fonds de cabanes et une série de fosses permettant d'identifier une réoccupation à la Tène Ancienne. Sur la commune, plusieurs ensembles funéraires fonctionnent du Bronze à la Tène, au lieu-dit *Allmend* où l'on dénombre 21 tertres, et sur la terrasse de graviers entre les communes de Réguisheim et d'Ensisheim où l'on a pu observer par photographies aériennes des enclos circulaires, quadrangulaires et allongés en forme de U.

A proximité immédiate des parcelles sondées, sous le site de l'actuelle usine THK, a été fouillé un habitat de type ferme indigène datée la période augustéenne, alors qu'au sud, près de la Thur, une agglomération secondaire antique semble être fréquentée plus tardivement, entre le 1 et le 4^{ème} siècle après J.-C. Sur une butte de loess, des fonds de cabanes révèlent l'occupation primo-médiévale qui s'étend du 8^{ème} au 10^{ème} siècle, et une nécropole utilisée de la fin du 5^{ème} à la première moitié du 6^{ème} siècle a été reconnue à proximité du tracé de la liaison routière. Le présent diagnostic a permis de repérer l'extension de cet ensemble funéraire. L'existence de nombreux vestiges fait d'Ensisheim un secteur à très fort potentiel archéologique. La proximité du projet d'aménagement avec l'usine THK, où ont été découvertes de nombreuses structures, a entraîné la réalisation d'une prospection magnétique.

5.2.3 Prospection magnétique sur le tracé de la RD201 – liaison routière

La prospection magnétique a été engagée sur la partie ouest du tracé, seul secteur où les terrains étaient accessibles (semis de blé et champs de maïs sur les parcelles encore cultivées). La prospection a été engagée avant le diagnostic pour éviter toute perturbation des niveaux superficiels causée par les tranchées de sondages (fig. 109). La prospection couvre l'emprise du tracé dans toute sa largeur, soit environ 40 m, sur 750 m de long, avec des profils espacés de 1 m. On mesure le pseudo-gradient magnétique vertical du champ magnétique terrestre : la méthode du champ total n'étant ici

pas envisageable à cause des fortes perturbations dues à la ligne à haute-tension qui longe le projet d'aménagement.



Figure 109 : Vue de l'enclos circulaire détecté comme anomalie magnétique par la méthode magnétique (cliché A. Ferrier)

Les différentes parcelles avaient été soumises à différents traitements des sols: compactées après ramassage et moisson (choux et blé) et labourées. Ces différences sont visibles sur les relevés magnétiques. Les vestiges caractérisant les occupations archéologiques, notamment ceux de la fouille du site THK, et les indices de sites repérés en photographie aérienne ont en commun d'être majoritairement des structures excavées, ce qui explique le choix de la méthode, seule à avoir été mise en œuvre ici (fig. 110). Les mesures effectuées sur étroite bande de 40 m ont révélé de nombreuses anomalies magnétiques. La plupart d'entre elles sont situées à proximité de la nécropole mérovingienne. Elles sont bien identifiables par leurs formes singulières et leur signal magnétique (anomalies linéaires circulaires, anomalies locales, anomalies linéaires à angles droits). Sur le reste du tracé, plusieurs anomalies linéaires et anomalies locales de faibles amplitudes ont également été cartographiées.

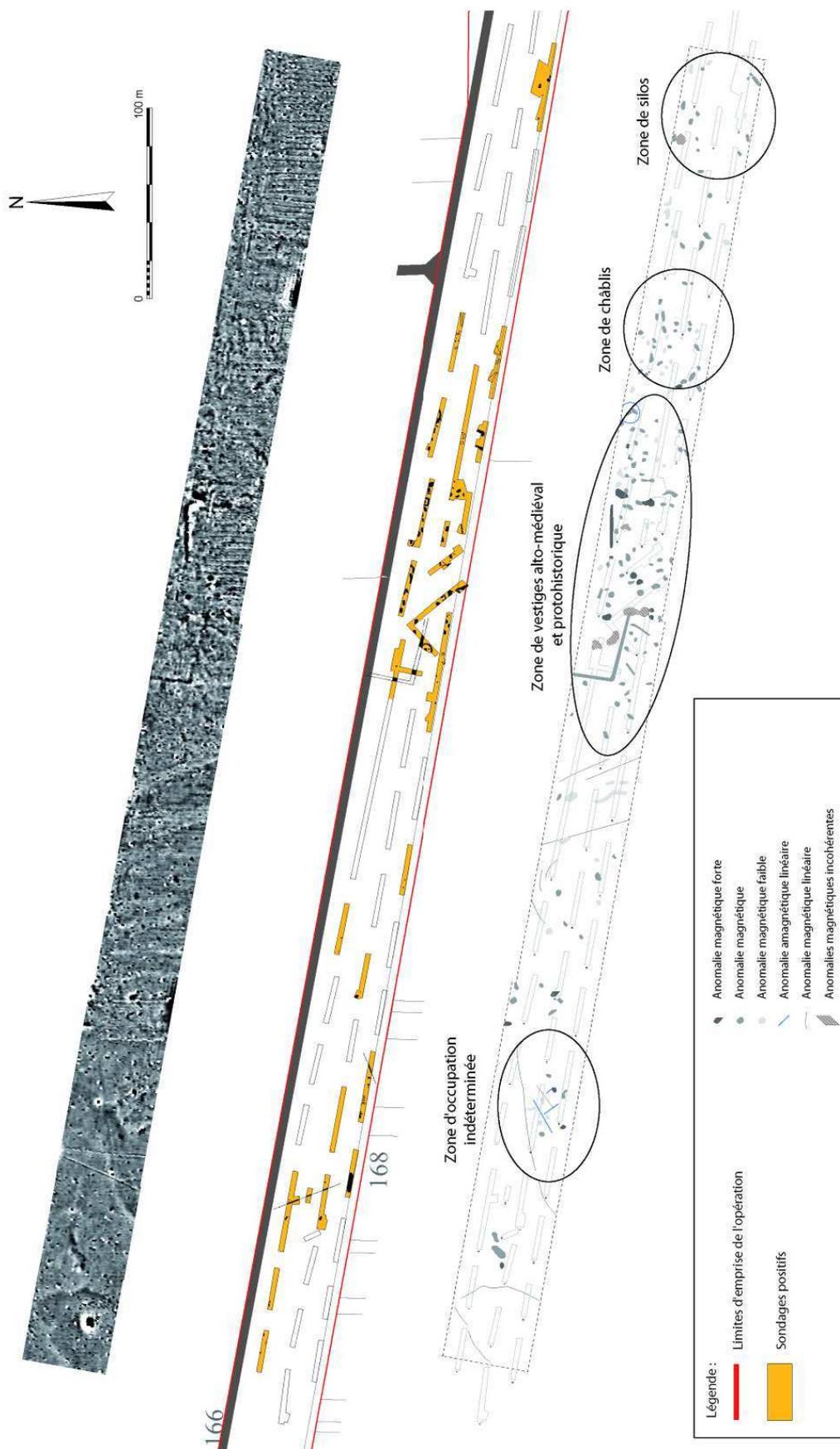


Figure 110 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre, résultats des sondages systématiques et interprétation géophysique des cartes (fond A. Ferrier).

5.2.3.1 La détection du groupe d'anomalies centrales : les indices d'un site

Le groupe d'anomalies le plus dense observé sur le tracé est en relation avec un site archéologique.

L'anomalie circulaire et les anomalies ponctuelles peuvent correspondre à des structures de la nécropole du premier Moyen-âge à proximité, alors que le fossé rectangulaire, par sa forme, serait plutôt à rattacher à une autre période. Ces hypothèses typo-chronologiques basées sur les seules anomalies magnétiques resteraient bien évidemment hypothétiques si elles n'avaient pas été validées par les observations de terrain. On remarque une différence de signal entre l'anomalie magnétique causée par le fossé sub-rectangulaire et l'anomalie causée par l'enclos circulaire. Pour l'enclos quadrangulaire le comblement est plus magnétique que le substrat alors que pour l'enclos circulaire le comblement semble moins magnétique. Cette différence n'a pas été observée visuellement lors de la fouille.



Figure 111 : Vue des fosses de sépultures du premier Moyen-âge. Au premier plan une fosse qui a été détectée, au fond de la tranchée une autre fosse de même taille non détectée en géophysique (cliché A. Ferrier)

Le recoupement des données archéologiques et des mesures magnétiques est cohérent. On note cependant des différences non négligeables entre les deux couches d'informations : certaines structures sont lisibles sur les cartes mais n'ont pas pu être observées sur le terrain alors que d'autres très nettement visibles durant la fouille n'ont pas été détectées par la méthode magnétique.

La diversité de taille des structures peut en partie expliquer ces différences de perception. Néanmoins, la profondeur des structures (40 cm) étant assez faible, celles de dimensions sub-métriques auraient dû être détectées, ce qui n'est pas le cas. Le niveau de conservation a pu également jouer un rôle, bien que certaines structures profondes n'aient pas été observées alors que d'autres, bien moins profondes, ont été détectées. Les différences entre les structures ayant ou non généré des

anomalies ont été observées dans les tranchées de sondage. Les fosses protohistoriques de taille sub-métrique apparaissent systématiquement sur les cartes. Leur contraste de propriétés magnétiques est donc suffisant pour générer une anomalie conséquente en surface.

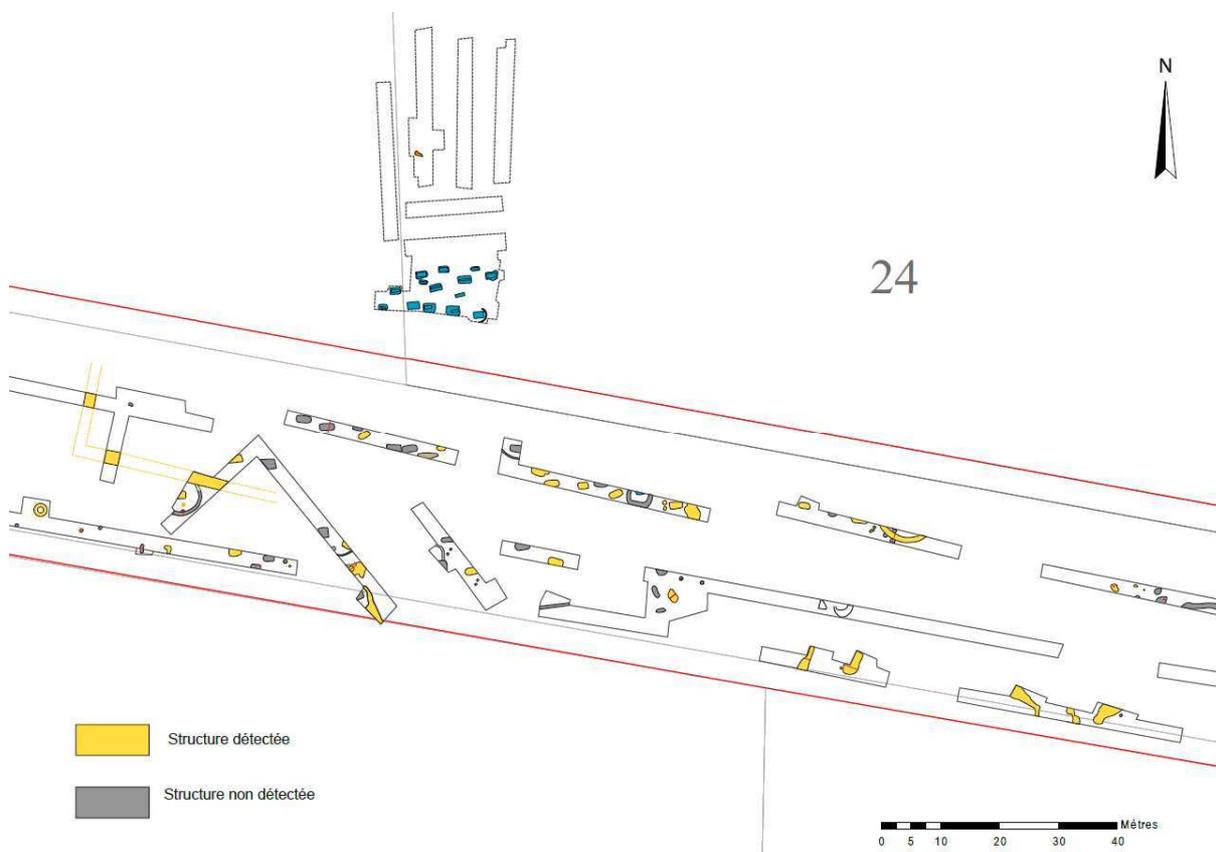


Figure 112 : Distinction des structures archéologiques découvertes en diagnostic détectée et non détectée. Il s'agit essentiellement de très petites structures ou de fosses de sépultures médiévales (fond A. Ferrier).

Les structures funéraires du premier Moyen-âge n'ont pas toutes été repérées en géophysique alors qu'elles présentent des géométries similaires entre elles, standards pour des fosses de sépulture (fig. 111). La différence de profondeur ne peut pas expliquer cette variabilité, car les structures les moins profondes apparaissent sur les cartes de prospections, mais la nature du comblement, plus ou moins magnétique, doit jouer un rôle (fig. 112). Il sera nécessaire de valider cette hypothèse après la fouille par la mesure en laboratoire du comblement des structures. Des différences dans les dynamiques de comblements sédimentaires pourraient expliquer la variabilité de comportement magnétique. Ces différences pourraient être mises en relation avec le « pillage » des tombes (remaniement des sépultures) qui aurait entraîné un brassage secondaire de sédiments de surface plus magnétiques ou par des différences dans les gestes funéraires. Des analyses micromorphologiques, sédimentaires et magnétiques pourront confirmer ou tout du moins affiner ces hypothèses, étayées par la fouille fine de ces structures.

5.2.3.2 Détection de structures fantômes

A l'inverse de ce qui a été vu ci-avant, certaines anomalies géophysiques ne semblent pas coïncider avec des structures archéologiques ou des creusements naturels (fig. 113). Le bruit de sol, dû aux irrégularités topographiques, ne peut pas expliquer ces anomalies moyennes, de 3 à 5 nT/m, d'amplitudes quasi-identiques à celles des structures archéologiques.

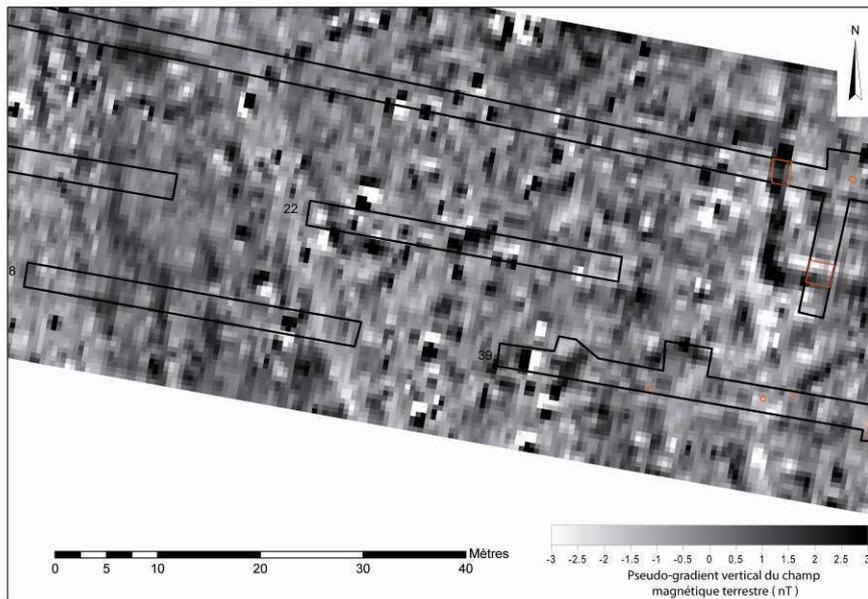


Figure 113 : Carte du pseudo-gradient vertical du champ magnétique terrestre superposée aux structures découvertes dans les tranchées de diagnostic (fond A. Ferrier)

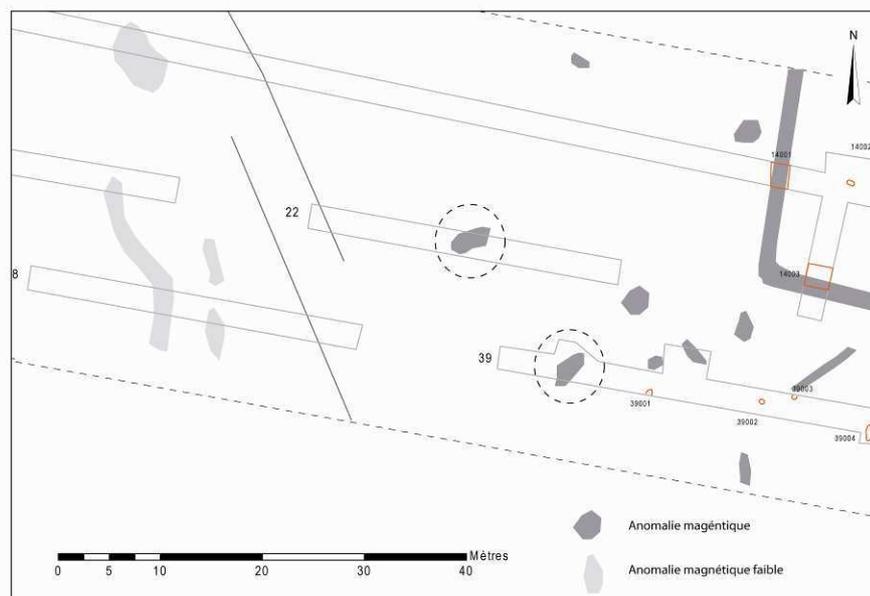


Figure 114 : Carte d'interprétation des anomalies du champ magnétique terrestre superposée aux tranchées de diagnostic (fond A. Ferrier)

Afin de rendre compte précisément de ce phénomène, il aurait fallu localiser l'ensemble des anomalies puis les tester par sondages mécaniques. Or les observations ont été faites après l'opération, lors d'une confrontation entre anomalies géophysiques et observations archéologiques. Dans le cadre de cette opération en raison de la richesse des anomalies détectées et de la difficulté de leur localisation systématique sur le diagnostic, des secteurs à fort potentiel archéologique ont été définis en préalable à l'ouverture par tranchées.

Une de ces anomalies coïncide avec une fenêtre décapée lors du diagnostic, où aucune structure n'a été enregistrée (fig. 114). Dans cette fenêtre, les premiers niveaux de décapage ont laissé entrevoir une structure « fugace » : le surcreusement réalisé pour tenter d'atteindre des contrastes visuels plus importants a été vain. La parfaite corrélation spatiale entre cette fenêtre et l'anomalie magnétique laisse cependant envisager la présence d'une structure archéologique ou d'un creusement naturel peu visible : expression d'un fantôme magnétique.

5.2.3.3 Structures profondes, fantômes magnétiques ?

Sur une zone plus à l'ouest, une dizaine d'anomalies linéaires et locales de faible amplitude s'organisent autour de trois anomalies linéaires parallèles et perpendiculaires au fossé 34013 (fig. 115). Lors du décapage, ces anomalies linéaires n'ont pas été retrouvées. Les structures archéologiques sont apparues sur cette zone entre 70 et 90 cm de profondeurs, excepté le fossé, à 60 cm. Aucun phasage chronologique n'a pu être établi par manque de matériel, néanmoins, les observations carpologiques dans ces structures contenant des carporestes carbonisés indiquent une activité anthropique. Parmi ces structures, on distingue plusieurs trous de poteaux et un niveau de galets de 60 cm de côté, à 90 cm de profondeur.

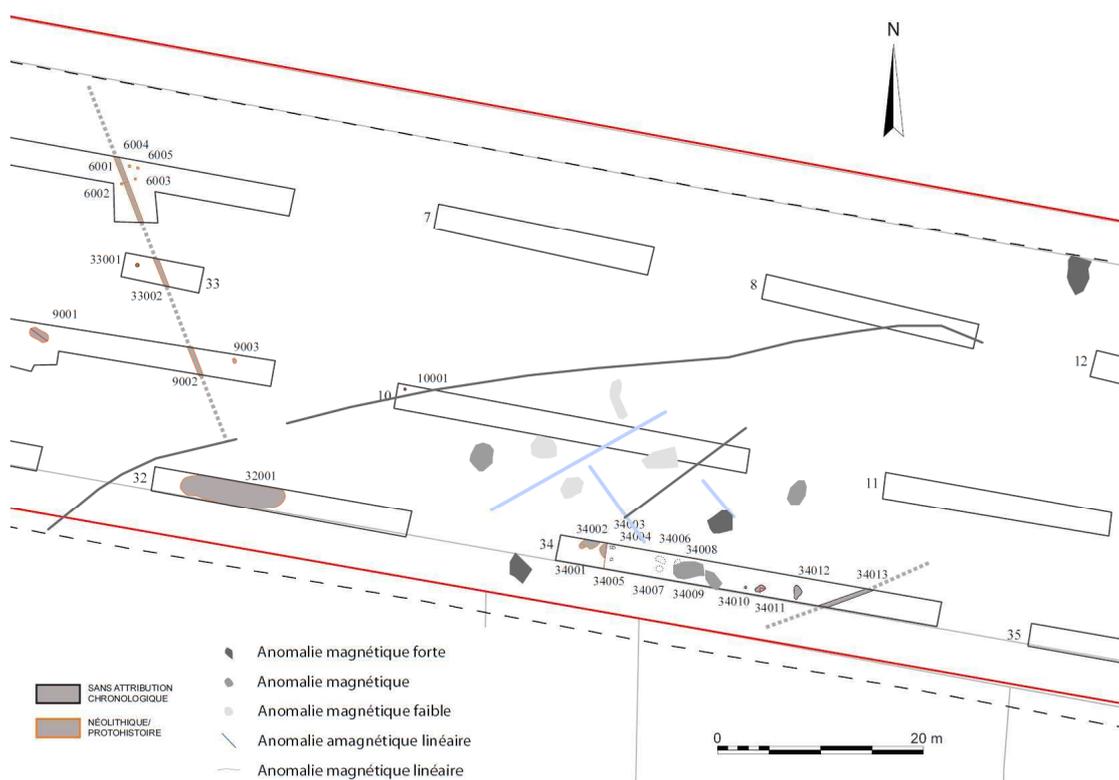


Figure 115 : Carte d'interprétation des anomalies magnétiques superposée aux structures découvertes dans les tranchées de diagnostic (fond A. Ferrier)

Les structures visuellement limitées à 10 cm d'épaisseur et situées à 0,7 m de la surface, n'auraient pas du être détectées (fig. 116 – 117): leur comblement ne présentant en effet pas de matériel qui aurait pu leur conférer un signal magnétique particulièrement fort. Or la prospection a permis d'en repérer certaines.

Il pourrait s'agir de structures où seul le fond offre des contrastes visuels assez importants avec l'encaissant alors que les parties plus élevées de la structure n'offrent plus ce contraste dans le contexte limoneux où le comblement et l'encaissant peuvent avoir la même texture. D'après les résultats magnétiques, il est peu probable que les profondeurs d'apparition des structures soient si importantes, les anomalies auraient alors été plus faibles et plus diffuses. La géophysique apporte ici des informations sur le comblement magnétique des structures et leur niveau de conservation, plus important que celui observé lors de la fouille.



Figure 116 : Vue du fossé à 60 cm de profondeur dans la tranchée 34 (cliché A. Ferrier)

Un niveau brun gris apparaît à 1,3 m de la surface, sous lequel on distingue nettement des structures qui se démarquent du substrat argileux jaunâtre. Ces structures, au comblement argileux compact et brun foncé, ont pu être circonscrites grâce à la présence de charbons. Des mesures de susceptibilité en diagraphie ont été réalisées à proximité de cette zone dans un endroit non touché par les sondages mécaniques afin de renseigner d'éventuels niveaux archéologiques, ou, au moins, de mettre en évidence des variations de comportement sédimentaire.



Figure 117 : Structure de la tranchée 34 à 70 cm de profondeur, présentant un très faible niveau de conservation (cliché A. Ferrier)

5.2.3.4 Mesures de susceptibilité magnétique en forage

Parallèlement au sondage 34, une série de trois diagraphies de susceptibilité magnétique a été effectuée (fig. 118). Sur la première, le sondage est limité à une très faible profondeur et les mesures

présentent des sauts de valeurs qui rendent les données inexploitable. Les deux autres sondages ont fourni des résultats plus cohérents.

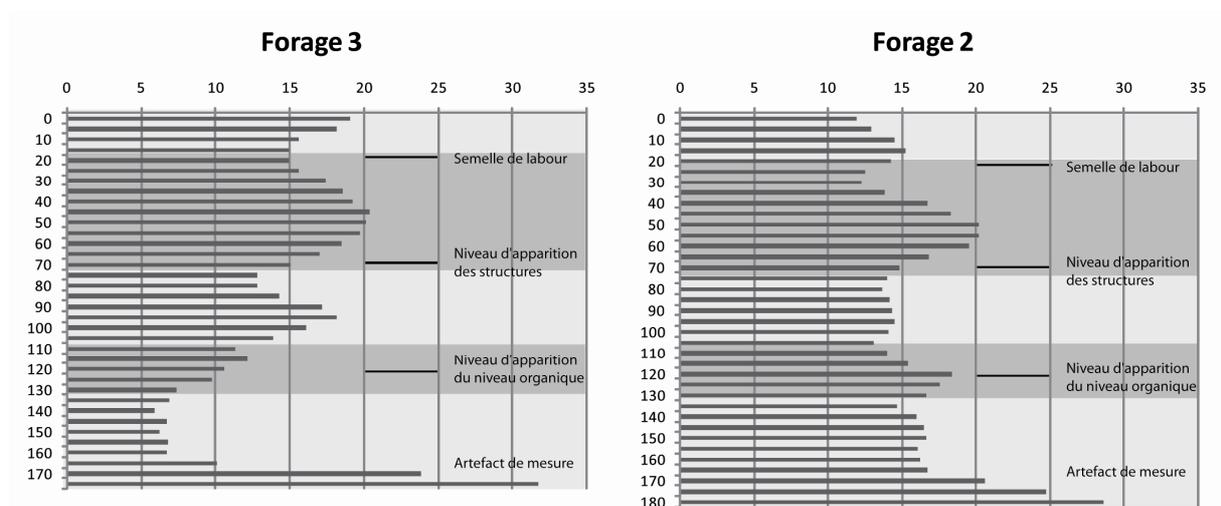


Figure 118 : Diagraphie de susceptibilité magnétique au bord de la tranchée 34 (carottage à la tarière à main puis mesures avec le MS2-H de Bartington)

Sur les trente premiers centimètres, les valeurs ne sont pas cohérentes entre les deux forages, mais ces différences peuvent être dues aux hétérogénéités entraînées par le labour sur les niveaux superficiels de terre arable.



Figure 119 : Vue des structures à 70 cm et 1,1 m de profondeur dans la tranchée 34 (clichés A. Ferrier)

On observe une augmentation de la susceptibilité avec la profondeur. Le maximum est atteint à 50 cm avec $20 \cdot 10^{-5}$ u.S.I. sur les deux profils, avant de retomber à $13 \cdot 10^{-5}$ u.S.I. Cette décroissance se stabilise à 70 cm de profondeur. Ce niveau de susceptibilité magnétique faible coïncide avec le premier niveau d'apparition de structures dans les sondages proches (fig. 119). Ensuite, la susceptibilité augmente faiblement jusqu'à 90 cm de profondeur (beaucoup plus fortement sur le

forage n°3) puis diminue avant de croître à nouveau jusqu'à 1,2 -1,3 m, où commence le niveau brun gris observé lors de la fouille (fig. 119). Sur le forage n°2, des valeurs de susceptibilité plus fortes pourraient correspondre à des erreurs de corrections de dérive. Enfin, les dernières mesures contiennent des valeurs aberrantes, probablement dues à la déformation de la section du forage.

Le niveau brun gris repéré dans les sondages à 1,3 m est en lien avec un pic de susceptibilité, contrairement au niveau d'apparition des structures à 70 cm associé à un faible niveau de susceptibilité magnétique. Cela pourrait s'expliquer par la présence d'un niveau à 50 cm révélé par un pic de susceptibilité. Les observations à 70 cm de profondeur révéleraient alors uniquement la partie visible des structures, 20 cm en dessous de leur probable niveau d'apparition géophysique. On peut observer le même phénomène à 90 cm de profondeur. A 120 cm de profondeur, la couleur caractéristique du niveau brun gris aurait mis en évidence cette strate, plus lisible que les deux autres premiers pics. Notons que l'ensemble de ces observations ne permet pas de raisonner sur une qualification archéologique des sédiments mais uniquement sur leurs caractéristiques magnétiques. Le parallèle entre physique et archéologie ne peut être établi avec certitude qu'en réalisant une coupe archéologique. Malheureusement, celle-ci s'est avérée peu lisible.

5.2.3.5 Détection de chablis, cohérence archéologique

A l'ouest de la zone B, la plus riche en anomalies magnétiques et en vestiges archéologiques, on observe de petites anomalies de moyenne à faible amplitude, qui ont suscité lors du décapage une attention particulière (fig. 120).



Figure 120 : Vue des structures indéterminées, mises en évidence par la géophysique (cliché A. Ferrier)

Le décapage a démontré qu'il s'agissait de chablis. Leur forme en croissant est tout à fait caractéristique. Menée seule, l'étude géophysique n'aurait pas permis de différencier la plupart d'entre

eux et de vérifier leur origine archéologique (fig. 121). Aussi il est toujours nécessaire de tester certaines structures afin de pouvoir les classer d'après leurs formes et la signature de leurs anomalies.

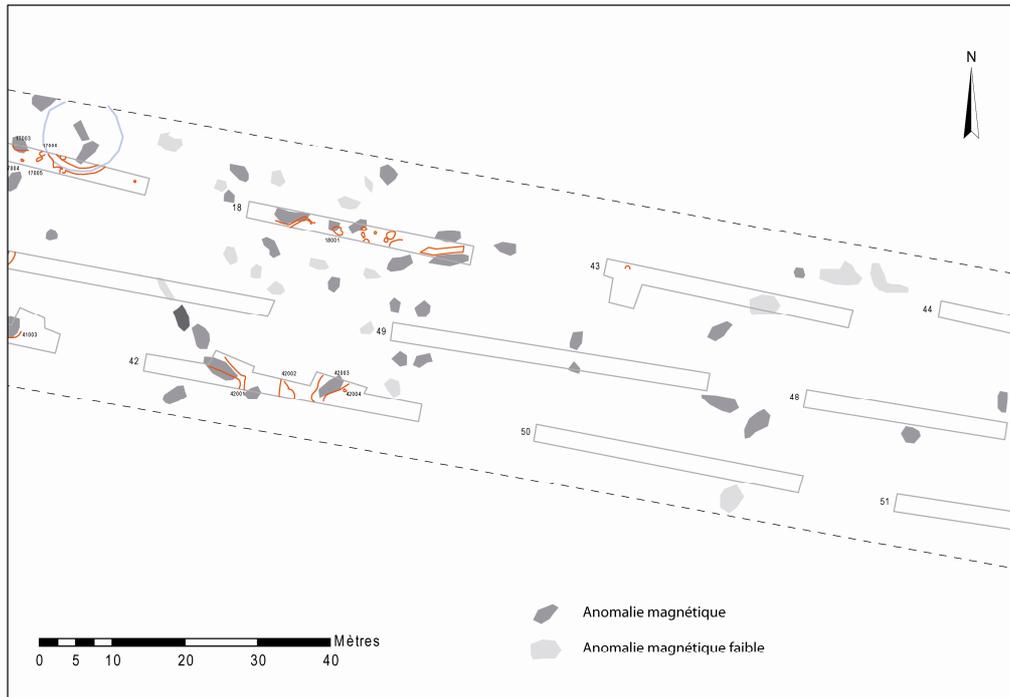


Figure 121 : Superposition de l'interprétation des anomalies géophysiques et des résultats du diagnostic archéologique (fond A. Ferrier)

5.2.4 Prospection magnétique sur la ZAID – Ensisheim Réguisheim

A l'extrémité Est de la future liaison routière entre la RD201 et l'A35, un projet d'aménagement de ZAID a été soumis à diagnostic archéologique (Ferrier 2010b). Une prospection géophysique concerne une partie de l'emprise, opération encouragée par les résultats obtenus sur la première phase.

Quelques éléments isolés ont été repérés, dont certains par le seul biais de la géophysique. Un niveau d'occupation augustéen a pu être mis en évidence sur la partie sud de l'emprise. De forme lenticulaire, celui-ci n'a pu être reconnu directement par prospection magnétique (fig. 122), qui en a par contre cartographié les limites, la différence verticale entre le niveau archéologique et le substrat géologique ayant donné lieu à des contrastes verticaux d'aimantation.

Plusieurs fossés retrouvés lors du diagnostic dans cette même zone sont clairement visibles sur les cartes géophysiques. Appréhendables sous forme d'anomalies linéaires, ils semblent recouper plusieurs tranchées, dans lesquelles aucune des structures pourtant visibles dans les tranchées voisines n'a pu être reconnue. Le contraste visuel n'est pas assez prononcé sur certaines sections de fossés pour

permettre de les distinguer systématiquement du substrat limoneux, dans l'étroite ouverture de la tranchée. Le niveau archéologique correspond aux anomalies magnétiques les plus fortes, coupé par une anomalie amagnétique, causé par une nappe de graviers qui scinde en deux le niveau archéologique. La carte de prospection apporte des informations sur l'organisation de ce niveau archéologique, prolongé par une anomalie beaucoup plus faible sans lien avec des faits ou des structures clairement observables sur le terrain. Les anomalies engendrées par leurs limites et leur organisation aura permis d'en préciser le plan archéologique.



Figure 122 : Vue du comblement du chenal (cliché A. Ferrier)

Le niveau archéologique est composé de limons argileux homogènes et compacts dans lesquels on trouve du matériel lithique (fig. 123), métallique mais aussi céramique, donc quelques éléments magnétiques. La plus faible anomalie magnétique dans son prolongement peut correspondre à la rupture d'une terrasse de graviers avec des limons de comblements plus récents.



Figure 123 : Vue du niveau archéologique de la Tène Finale (cliché A. Ferrier)

Les prospections magnétiques ont mis en évidence des chenaux aux comblements magnétiques, argilo-limoneux, dans un encaissant gravelo-sableux amagnétique (fig. 124). Un des deux chenaux observé lors du diagnostic n'a pas été reconnu en prospection magnétique ce qui est dû à sa géométrie lenticulaire et aux dynamiques de comblement n'ayant pas favorisé le dépôt de sédiments

magnétiques. Ces indices de comblements sédimentaires sont décalés par rapport aux indices micro-topographiques des données LIDAR, décalage « attribuable aux différentes informations apportées par ces deux niveaux d'informations ». Alors que le LIDAR révèle la dernière phase d'activité du chenal, les données magnétiques nous renseignent plutôt sur les dynamiques de comblement (fig. 125).



Figure 124 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre sur le projet de ZAID d'Ensisheim (fond A. Ferrier)

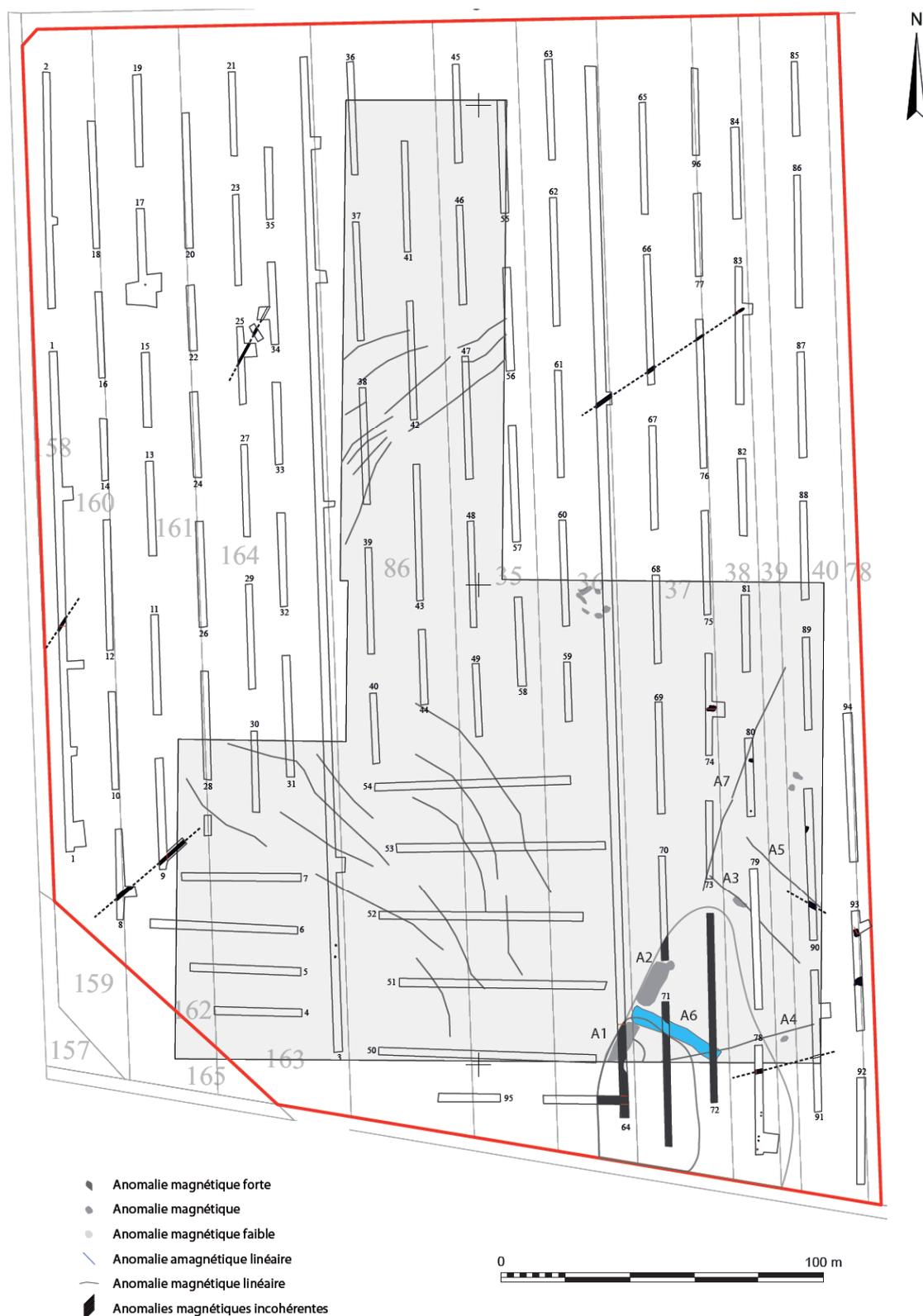


Figure 125 : Interprétation des anomalies magnétiques sur le projet de ZAID d'Ensisheim (fond A. Ferrier)

6 Les sites de plaine – Rieds et plaine d’inondation

6.1 Houssen – *Ostheimerweg* -

La prospection réalisée en amont de l’opération de diagnostic, au nord de Houssen, couvre une surface de 1,7 hectare et a nécessité moins d’une journée pour l’acquisition des mesures. Elle a été engagée en raison du fort potentiel archéologique de cette commune, plus important au Sud du village actuel. Cette prospection avait donc pour objectif de tester le potentiel de la méthode magnétique sur une zone péri-urbaine (fig. 126), sans informations préalables quant à l’existence de vestiges.

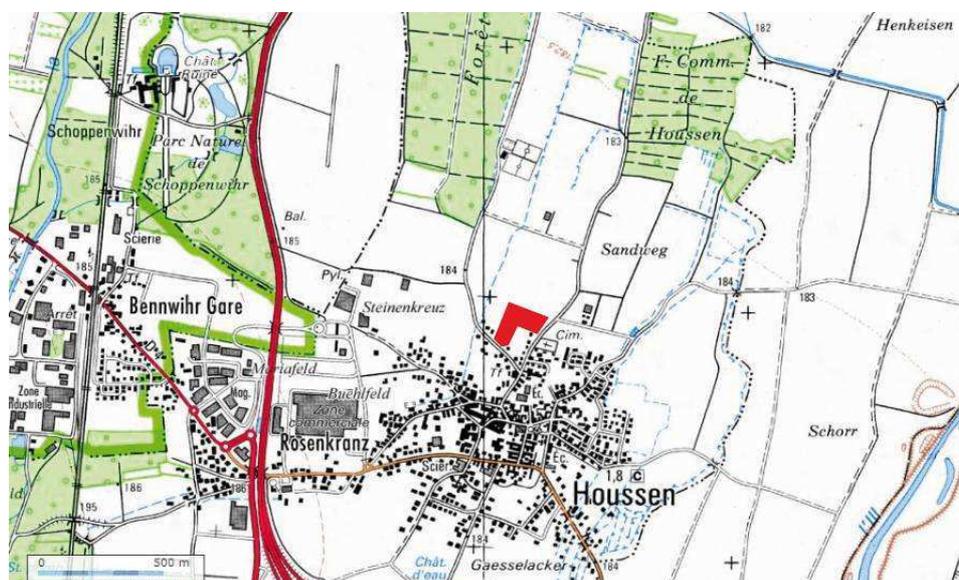


Figure 126 : Carte de localisation du diagnostic de Houssen – *Ostheimerweg* – (source IGN)

6.1.1 Contexte géologique et stratigraphique

Houssen est localisé en bordure nord du cône de déjection de la Fecht et de la Weiss – deux rivières vosgiennes – qui forme un éventail de 30 km de long incisé par l’Ill qui s’écoule vers le Nord. Durant l’holocène, celle-ci a permis la formation d’une terrasse sur laquelle sont implantées les communes de Colmar, d’Houssen et d’Ostheim au Nord.

Le site est implanté en limite de ce cône de déjection et présente un sol à caractère hydromorphe, similaire à ceux du Ried Centre Alsace. Les niveaux limoneux de débordements recouvrent comme sur la quasi-totalité des sites de la plaine d’Alsace des formations gravelo-sableuses tardiglaciaires.

Le site présente une stratigraphie assez complexe et variable (fig. 127). On y observe plusieurs couches intermédiaires entre la terre végétale et le niveau argileux gris bleuté compact sans forme de pédogenèse apparenté au substrat. Sous les 20 à 30 cm de terre végétale s’étend une unité limono-argileuse, remaniée, non carbonatée, qui suggère des apports d’origines vosgiennes. Elle coïncide avec

un premier niveau d'apparition de structures, scellant lui même une couche de limons argileux en partie remaniés, non carbonatés, et dans lesquels on été retrouvés des épandages de matériaux datés de la Tène Finale et de l'Antiquité précoce. Ensuite prend place un niveau de limons argileux clairs, non carbonatés, où l'on distingue des épandages de mobilier archéologique. Ce niveau recouvre une couche argileuse avec des tâches d'oxydo-réduction, qui coïncide avec le niveau d'apparition des structures perforant les couches sous-jacentes. Il provient d'une phase de lessivage de la couche supérieure. Enfin, le dernier niveau avant les argiles bleutées est composé de limons argileux ponctués de tâches bleutées dues à son caractère hydromorphe, l'argile sous-jacente ayant contribué à la stagnation de l'eau. Sous ce niveau apparaissent les structures les plus anciennes et les plus profondes.

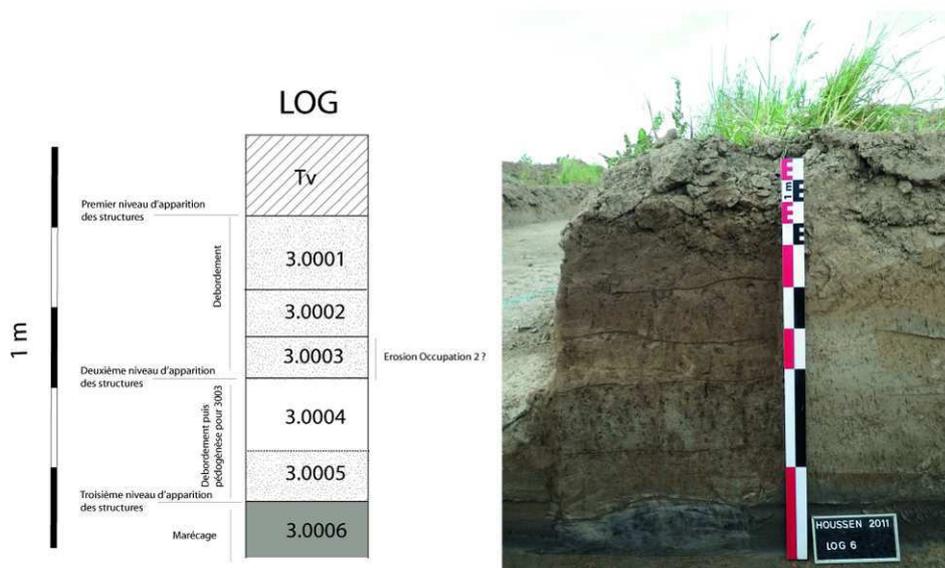


Figure 127 : Log stratigraphique du site de Houssen, 6 phases de dépôts se succèdent et révèlent un enregistrement sédimentaire et archéologique complexe (Bonvalot 2011)

On peut donc proposer l'interprétation suivante (Bonvalot 2011). Dans un premier temps, la formation d'un niveau argilo-limoneux gris bleuté est le produit de l'existence d'un marécage. On voit dans la première occupation la volonté d'assainir le site avec le creusement de fossés (de drainage ?). Cette période précède des phases d'inondations qui entraînent le dépôt d'un niveau de débordements, plus tard lui-même sujet à une phase de pédogenèse (tâches blanchâtres de lessivage). Il s'ensuit une réoccupation du site à la Tène Finale. L'occupation est à nouveau entrecoupée par un épisode de crue. Enfin, une troisième et dernière occupation du site est datée de la Tène Finale/Gallo-romain précoce.

6.1.2 Contexte archéologique

Houssen est occupé d'est en ouest, essentiellement dans sa partie sud. Sur le seul site du centre commercial Cora Houssen et de la base de loisirs, les occupations s'échelonnent du Néolithique

Moyen au Premier Moyen-âge, presque sans hiatus. Les occupations postérieures semblent beaucoup plus diffuses. Des prospections ont cependant permis de détecter des vestiges antiques à l'est du site. Le diagnostic a mis en évidence 93 structures dont 27 contenaient du mobilier céramique, assez bien conservé. Les niveaux d'apparitions varient entre 50 cm et 1 m, avec des structures dont le diamètre varie de 40 cm à 2,5 m, rarement conservées sur plus de 30 cm de profondeur. L'une d'elle concentre un nombre anormal d'artefact. Le diagnostic a également exhumé un puits invisible dans les niveaux superficiels, de 3 m de diamètre. Des trous de poteau conservés sur 10 cm sont apparus entre 50 et 70 cm de profondeur, avec un comblement contenant des inclusions de nodules de charbons.



Figure 128 : Vue d'une des tranchées et qui présente de nombreuses structures (cliché F. Bonvalot)

Les structures se caractérisent donc par des tailles variables et des niveaux d'apparition hétérogènes, depuis la proche surface jusqu'à près de 1 m (fig. 128), même si elles ne sont conservées que sur une très faible profondeur. La méthodologie mise en place sur ce diagnostic se veut différente de ce qui est couramment réalisé dans la région : des tranchées longues plutôt que des tranchées disposées en quinconce qui permettent de préserver au mieux ces vestiges stratifiés et complexes.

6.1.3 Résultat géophysique

Les mesures du pseudo-gradient magnétique ont été réalisées avec un écartement de 1 m entre les profils. On observe au Sud-ouest et au Sud de la carte de très fortes perturbations qui sont dues aux éléments métalliques des murets entourant les propriétés mitoyennes (fig. 129). Sur le reste du terrain, des anomalies ponctuelles d'assez forte amplitude sont générées par des objets en fer disséminés. Aucune des structures découvertes au cours des sondages ne correspond pas à une anomalie magnétique sur les cartes, et ce, quelles que soient leurs profondeurs. Il se pourrait que le niveau de bruit de ce terrain fortement pollué (éléments ferreux en surface) ait empêché la détection de certaines structures archéologiques. Néanmoins, ces structures ne sont pas systématiquement situées sous une

anomalie forte ponctuelle et auraient parfois du être à l'origine d'une anomalie observable, au moins dans les niveaux superficiels.

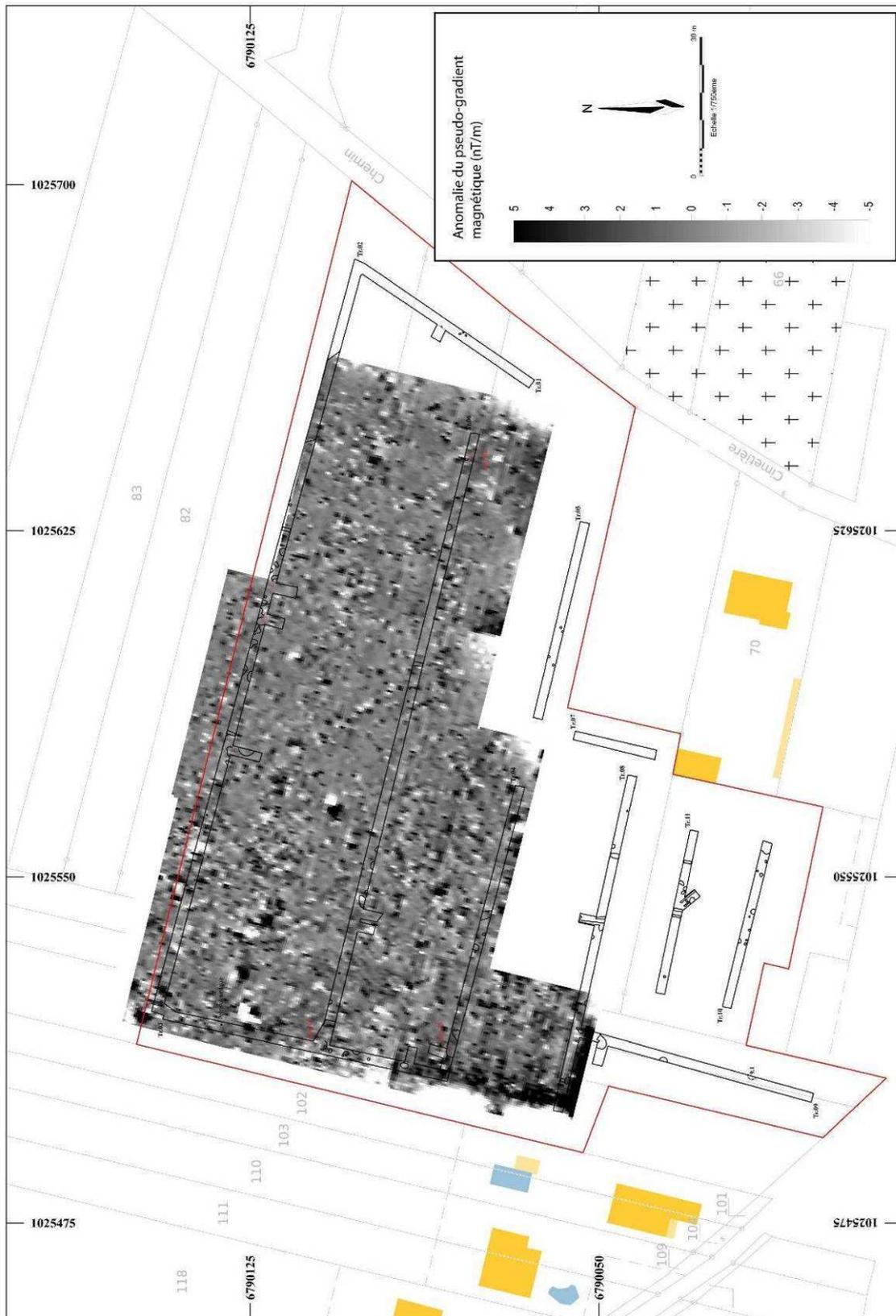


Figure 129 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre superposée aux résultats du diagnostic archéologique (fond F. Bonvalot)

Ce phénomène pourrait s'expliquer par la situation géologique du site qui a été l'objet d'épisodes marécageux. Dans ce contexte particulier, l'argile située sous les niveaux archéologiques fait office de niveau imperméable et crée des conditions anaérobies : les minéraux magnétiques sont dissous et il en résulte probablement une très faible susceptibilité magnétique du comblement des structures et des niveaux d'occupations. L'indisponibilité du susceptibilimètre n'a malheureusement pas permis d'étayer ces hypothèses. Cette limite ne permet pas d'envisager la détection de structure par le biais des propriétés magnétiques. Les problèmes de détection liés à la stratification n'ont donc pas pu être abordés.

Dans ce contexte péri-urbain, les prospections magnétiques s'avèrent très peu efficaces et beaucoup trop sensibles aux bruits magnétiques. Des prospections électriques ou électromagnétiques auraient peut-être fourni de meilleurs résultats, bien que les contrastes entre les structures et les niveaux argileux doivent être assez faibles.

6.2 Roeschwoog – Am Wasserturm -

Les méthodes géophysiques ont été mises en œuvre sur le site de Roeschwoog : sur surface décapée - nécropole et secteur d'habitat - puis en dehors de l'emprise pour caractériser l'extension de l'habitat.

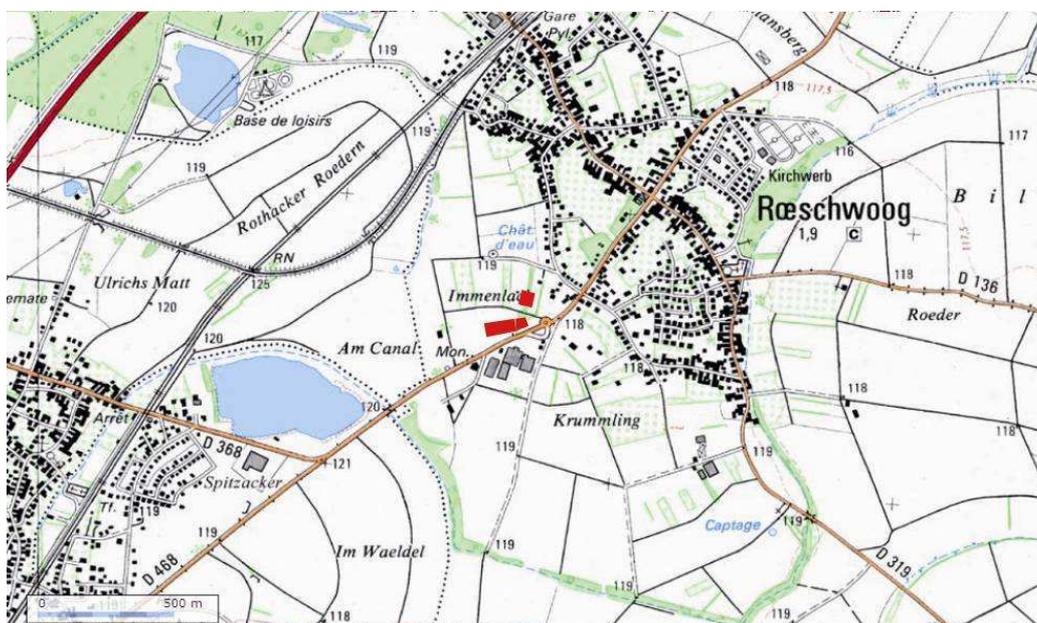


Figure 130 : Carte de localisation du site de Roeschwoog – Am Wasserturm – (source IGN)

L'objectif était de reconnaître les structures peu lisibles de la nécropole dans les limons (faible contraste visuel entre l'encaissant et le comblement des structures), ainsi que les structures invisibles

et les niveaux de sols sur la partie de l'habitat. Les terrains sont occupés par des champs et des prés (fig. 130).

6.2.1 Contexte géomorphologique

Le site est implanté dans la plaine alluviale du Rhin, 30 km au Nord-est de Strasbourg, à 5 km du fleuve, dans la région du Ried Nord qui s'étend de la forêt de Haguenau à la Forêt Noire. La nécropole et l'habitat sont séparés par un ancien chenal du Rhin. Avant les travaux de canalisation du Rhin au 19^{ème} siècle par l'ingénieur Tulla, le système hydrographique de ce secteur est complexe, à méandres sinueux. Une partie de ces méandres a été réoccupée par la Moder avant le 18^{ème} siècle, période où elle a été volontairement déviée. Ce système hydrographique a laissé des traces encore visibles dans le paysage environnant. De ce fait, le terrain présente un très léger relief. Au sud, il culmine à 119,8 m puis inscrit vers le nord une faible pente (1,7%) pour atteindre 118 m dans une dépression creusée par l'ancien bras du Rhin. Il remonte ensuite légèrement plus au nord sur une seconde terrasse. Ce chenal semble actif à la protohistoire. Il a probablement eu un impact direct sur les dynamiques sédimentaires environnantes. L'occupation est enfin recouverte par des alluvions rhénanes récentes. L'ensemble des formations superficielles repose sur une nappe grossière gravelo-sableuse homogène qui a pu être remaniée à l'Holocène. Cette terrasse apparaît directement sous la terre végétale dans la partie sud. Dans ce secteur, la matrice limoneuse et sombre contient une importante fraction grossière, alors que sur la terrasse, au nord, des limons homogènes et meubles de couleur jaunâtre présentent une matrice plutôt argileuse. Sur ces formations s'est développé un niveau de terre végétale de 30 à 40 cm (Koziol 2012).

6.2.2 Contexte archéologique

Les anciens travaux, relatifs à l'aménagement périphérique de la zone d'étude, ont mis au jour une partie du site (Châtelet 2000). Cette fouille a livré des vestiges – fonds de cabanes, puits, tombes isolées et four à chaux – associés à un habitat du premier Moyen-âge occupé entre la première moitié du 7^{ème} et le milieu du 9^{ème} siècle. En 2008, la partie d'un habitat ainsi qu'un site funéraire, (probablement l'extension de ce premier site), ont été révélée en diagnostic. Suite à ces découvertes, deux fenêtres de décapages respectivement de 3800 m² et 5000 m² sur l'habitat et la nécropole ont été prescrites.

Sur la partie habitat, cinq bâtiments, d'une largeur commune de 5,5 m pour des longueurs variables pouvant atteindre 14,5 m, ont été reconnus à partir des alignements de trous de poteaux, ainsi qu'un petit édifice, d'une longueur de 2,25 m et de 1,75 m de large, probablement un grenier. Autour de ces aménagements, la fouille a révélé 13 fonds de cabanes, un puits et un ensemble de fosses. Les

structures ont livré un important lot de céramiques (15 000 tessons) ainsi que des fragments de parois de fours et des scories dans la partie ouest du site. Cet habitat semble avoir été occupé du 7^{ème} au 10^{ème} siècle.

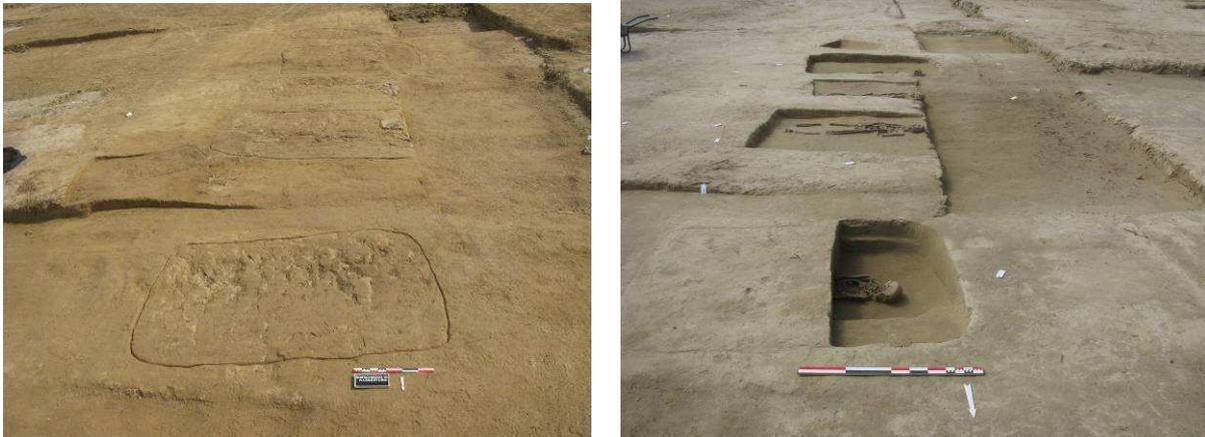


Figure 131 : Vue des sépultures avant et en cours de fouille. Sur la droite le terrain présente de nombreux palier de décapage. Sur ces sépultures le comblement de la fosse a pu être assez bien observé (clichés A. Koziol)

La nécropole située à 200 m, de l'autre côté d'un paléochenal du Rhin, est composée d'un enclos circulaire, dont seule une moitié a été dégagée, et de 39 tombes (fig. 131). Plusieurs d'entre elles sont alignées, tandis que d'autres sont disposées sans organisation cohérente (fig. 132). Elles ont livré un riche matériel : armes, plaques boucles, nombreux bijoux que l'on a pu dater du 6^{ème} et du 7^{ème} siècle. Les datations radiocarbone attribuent les autres structures du 8^{ème} au 10^{ème} siècle. Les deux ensembles semblent donc contemporains. La fouille simultanée d'un habitat et d'un ensemble funéraire est exceptionnelle en Alsace.



Figure 132 : Vue d'une sépulture avant et en cours de fouille. Les différences observées entre la structure avant et après fouille rend compte des incertitudes quant à la reconnaissance des limites de la structure (clichés A. Koziol)

6.2.3 Etude de la nécropole

6.2.3.1 Cartographie magnétique de la nécropole

La prospection de la nécropole couvre une surface de 50 m par 47 m (fig. 133). Au Nord, le champ magnétique terrestre est fortement perturbé par des barrières de sécurité métalliques. Les différents niveaux de décapages (paliers sur la zone de fouille) ont également créé des anomalies linéaires.

Une anomalie linéaire concordante avec un fossé formant un demi-cercle peut être interprétée comme une section d'enclos : elle coïncide avec les structures 1034 et 1027, qui semblent faire partie d'un même fait archéologique. On distingue une anomalie identique – en arc de cercle – à proximité de la sépulture 1028.

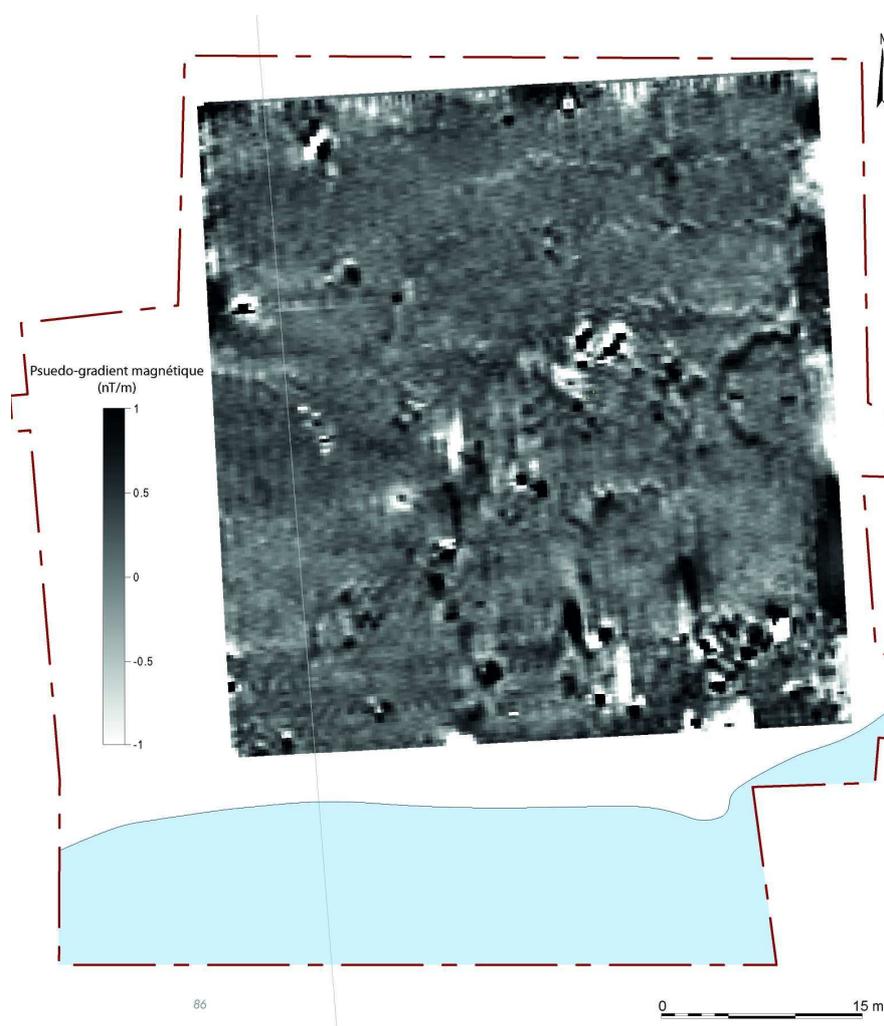


Figure 133 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre. Le très faible signal des structures nécessite de resserrer l'échelle au maximum ce qui induit un aspect bruité des données

Plusieurs anomalies sont orientées selon un axe Nord-Sud, dont certaines dans le prolongement de structures découvertes lors de la fouille. Elles sont datées de l'époque moderne et

contemporaine. D'autres anomalies magnétiques sont localisées à proximité des sépultures avérées. Ces anomalies pourraient correspondre aux comblements des fosses de sépultures. Autour de ces groupes, des anomalies magnétiques ponctuelles très fortes signalent sans doute des objets métalliques.

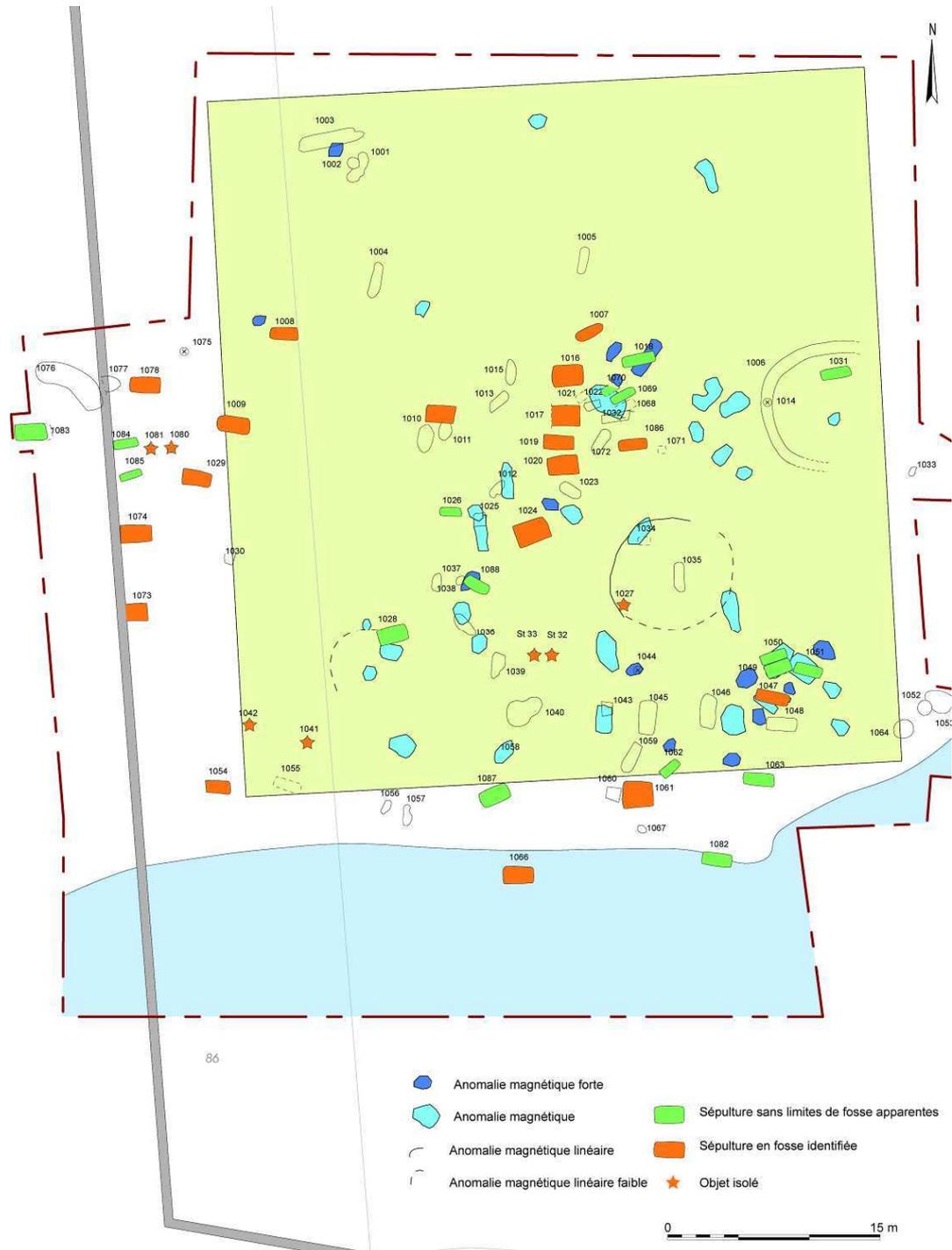


Figure 134 : Carte d'interprétation des anomalies géophysiques associée au relevé des structures fouillées (DAO : A. Koziol, F.-X. Simon)

Plusieurs anomalies présentant les mêmes orientations sont également visibles dans des zones où des fosses n'ont pas été observées (fig. 134). Certaines d'entre elles seraient reliées - d'après les

données de prospection - à des fosses de plus grandes dimensions que celles observées sur le terrain. La différence de géométrie entre l'anomalie et la structure est ici fortement minimisée par la proximité de la structure avec le capteur magnétique. A l'est de l'enclos, un groupe d'anomalies alignées pourrait également coïncider avec des fosses de sépultures non reconnues sur le terrain.

6.2.3.2 Mesure de susceptibilité sur la surface décapée

Des mesures complémentaires sur plusieurs structures ont été effectuées avec le MS2 de Bartington Ltd.

Le fossé 1006 présente une susceptibilité magnétique de 20.10^{-5} u.S.I. alors que les structures 1030, 1034 et 1040 présentent des valeurs de susceptibilité de 10.10^{-5} u.S.I. Ces données confirment l'existence de contrastes de susceptibilité magnétique entre les fosses de sépultures et le substrat. Les fosses plus récentes, orientées nord-sud, ont des signatures magnétiques plus fortes que les fosses de sépultures, ce qui s'explique par les différences de dynamiques naturelles ou artificielles des comblements sédimentaires.

Le comblement naturel des structures implique un brassage de terre avec un apport massif de sédiments des niveaux de sols superficiels. Pour les sépultures, le comblement des fosses - immédiat après le dépôt -, se fait avec la terre préalablement retirée, ce qui entraîne un faible brassage des niveaux de sols superficiels.

Ces faibles contrastes magnétique entre les structures et l'encaissant sont cependant très utiles dans les contextes loessiques où les contrastes colorimétriques peuvent être inexistantes. La délimitation visuelle des fosses ne peut qu'être partiellement réalisée sur la fouille. De même, la détection des sépultures est tributaire de l'apparition des squelettes ou du matériel associé. Le décapage entraîne souvent des dégradations sur les vestiges et ne sont retrouvées que les sépultures apparaissant en premier dans les niveaux les plus superficiel. La fouille limitée dans le temps ne permet pas la multiplication de décapages successifs sur l'ensemble de la zone après chaque découverte.

6.2.4 Etude de l'habitat

6.2.4.1 Prospections magnétiques sur la fouille de l'habitat

La prospection a été encouragée par les observations du diagnostic sur cette zone où le comblement des structures est peu contrasté, brun sombre avec des inclusions de graviers dans un substrat limono-graveleux de même couleur.

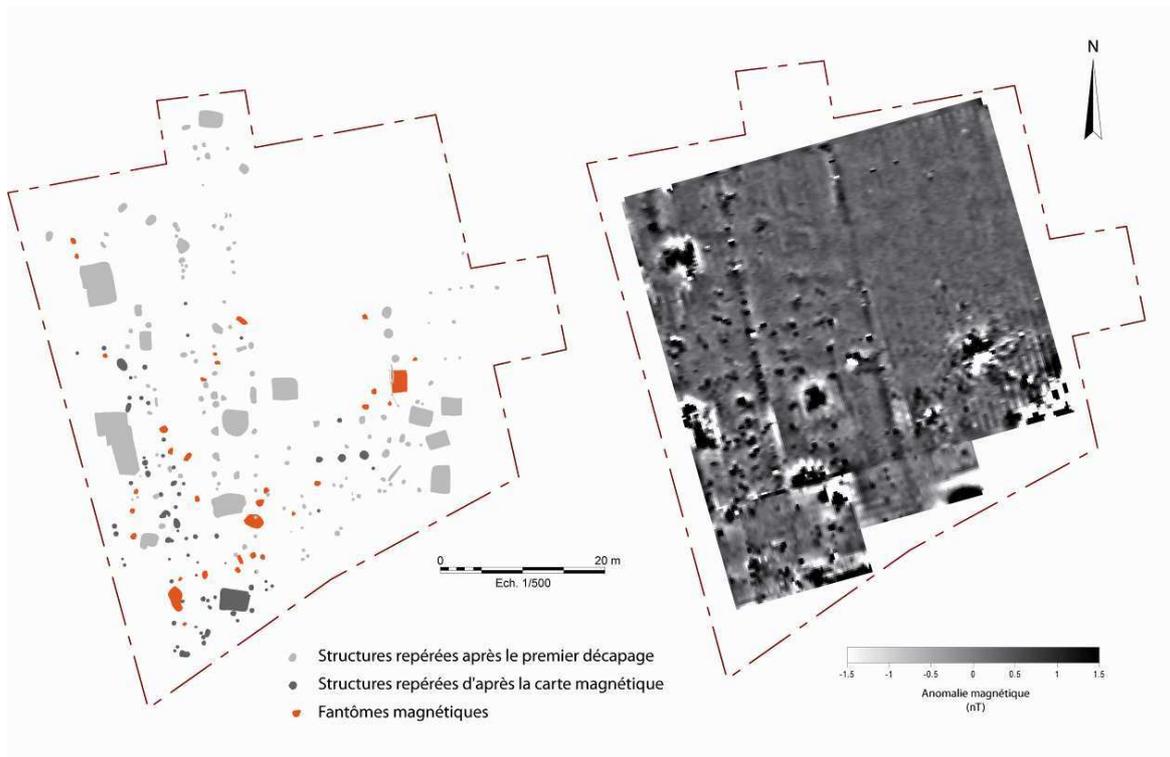


Figure 135 : Comparaison entre la carte du pseudo-gradient magnétique et les structures découvertes à la fouille, par le biais de la géophysique et les anomalies non reconnues (DAO A. Koziol, F.-X. Simon)

Les prospections magnétiques ont mis au jour un très grand nombre d'anomalies (fig. 135). Après comparaison avec le plan des structures repérées (fig. 136), il s'avère que ces anomalies correspondraient pour les deux tiers à des structures déjà reconnues sur le terrain. Cette constatation a permis d'assurer la détectabilité des vestiges par la méthode magnétique.



Figure 136 : Vue de deux structures excavées : à gauche le comblement de la structure est identique au substrat gravo-limoneux alors qu'à droite le comblement plus foncé se distingue du substrat (clichés A. Koziol)

Le tiers des structures restantes sont donc des vestiges supplémentaires, non visibles sur le terrain, qui ont par exemple permis de compléter le plan du bâtiment III, dont 4 des 8 trous de poteau n'avaient pas été vus initialement (fig. 137). La cohérence spatiale des anomalies avec les vestiges observés a rendu aisée leur intégration à la réflexion archéologique.



Figure 137 : Vue générale de la fouille et du bâtiment III découvert partiellement par la méthode magnétique (cliché A. Koziol)

De nombreuses anomalies ne présentent cependant pas d'organisation particulière et il est donc très difficile de les associer à des bâtiments ou à des ensembles de structures pouvant organiser l'espace (Logel 2010).

Les fonds de cabane sont très magnétiques. Ils sont effectivement remplis de matériaux rubéfiés, de terre cuite et plus rarement de scories (fig. 138). Le mélange de ces éléments produit une résultante nulle de l'aimantation thermorémanente et une orientation globale de l'anomalie parallèle au champ magnétique terrestre où seule la très forte aimantation induite génère l'anomalie.



Figure 138 : Vue de deux fonds de cabane : à gauche des éléments rubéfiés massifs ont pu générer un signal magnétique fort. À droite les trous de poteau au fond de la structure ont été mis en évidence avec de l'eau pour augmenter les contrastes, ce qui induit une certaine subjectivité quant à la reconnaissance de ces formes (clichés A. Koziol).

Une anomalie à l'Est, très forte et non orientée, n'a pas pu être expliquée par manque d'analyses complémentaires et d'observations sur le terrain. Aucune limite n'apparaissait au sol. L'origine de cette aimantation probablement rémanente, reste donc inexpliquée. Elle est peut-être associée à une chauffe en surface, naturelle (foudre) ou anthropique, qui aurait modifié les propriétés magnétiques du sol plus en profondeur (la profondeur concernée par ces de type de perturbations étant cependant assez faible (Marmet 2000)).

6.2.4.2 Mesures de susceptibilité magnétique et estimation de la dépendance fréquentielle et de la viscosité magnétique

Mesures réalisées avec le MS2 B

Des mesures de susceptibilité magnétique à deux fréquences ont été réalisées sur des échantillons prélevés dans plusieurs fonds de cabane (fig. 139). Deux des six échantillons se démarquent par de faibles valeurs de susceptibilité magnétique alors que tous les échantillons présentent des valeurs relativement élevées et une dépendance fréquentielle comprises entre 5 et 9 %.

Les échantillons devraient présenter des rapports viscosité sur susceptibilité magnétiques globalement similaires (dédit de la dépendance fréquentielle dans l'hypothèse des grains monodomaines), dû à des phénomènes d'oxydation ou de chauffe.

Or ces rapports diffèrent selon les structures et semblent suivre deux tendances (fig. 140). Pour le premier groupe, le rapport est assez faible, de l'ordre de 5%, alors qu'il est plus élevé, 9%, pour le second ensemble. La littérature permet d'estimer un rapport moyen de 7 à 10 % pour des échantillons de sols sans métallurgie et de 2 % pour les scories et battitures (Dabas 1989). Le premier ensemble peut donc être en lien avec la présence d'éléments métalliques dans les sédiments. Le deuxième rapport se rapproche de valeurs beaucoup plus cohérentes pour des éléments non associés à la métallurgie.

Dans le contexte considéré, le rapport semble associé à une période d'occupation, plus qu'à la nature des structures. Or le temps ne peut pas expliquer des différences de rapports de viscosité magnétique sur susceptibilité magnétique.

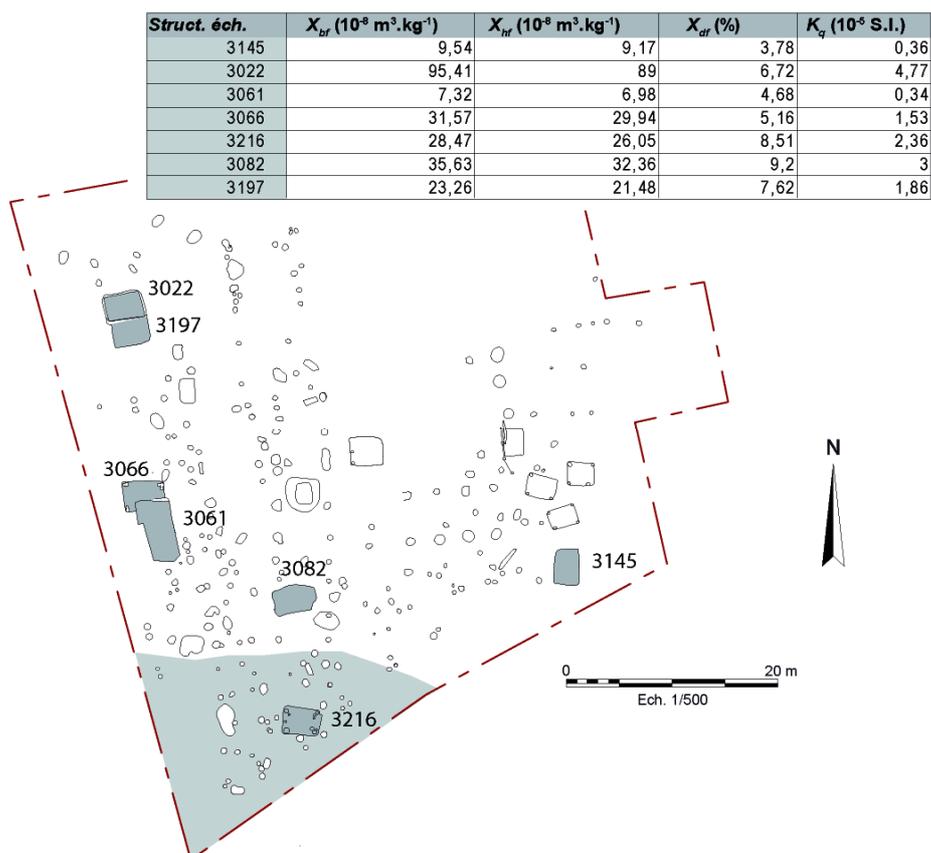


Figure 139 : Carte des valeurs de susceptibilité magnétique volumique basse et haute fréquence (MS2B), calcul de la dépendance fréquentielle de la susceptibilité de l'échantillon et estimation de la viscosité magnétique : en bas la localisation des différents échantillons sur la fouille (fond A. Koziol)

Une pollution métallique associée à une période d'occupation aurait pu entraîner ces différences, mais si seules deux occupations caractérisent le site – ce qui semble être le cas d'après les datations céramiques – alors la première s'étale sur la période Nord 2 (630/650 -670/680) tandis que la suivante s'étend du N3 (670/680 -720/730) au N4 (720/730-840/850) (Koziol 2012). La première période d'occupation, identifiée du N2 au N2/N3 (Koziol 2011) ne serait donc pas associée à une activité métallurgique contrairement aux périodes N3 à N4. Les mesures de susceptibilité magnétique et de leur dépendance fréquentielle pourraient donc être ici un indicateur chronologique associé à une pollution engendrée par un type d'activité à l'échelle du site. Elles pourraient ainsi affiner le phasage et préciser les fonctionnements synchrones de certains types de céramiques (au même titre que des datations radiocarbone).

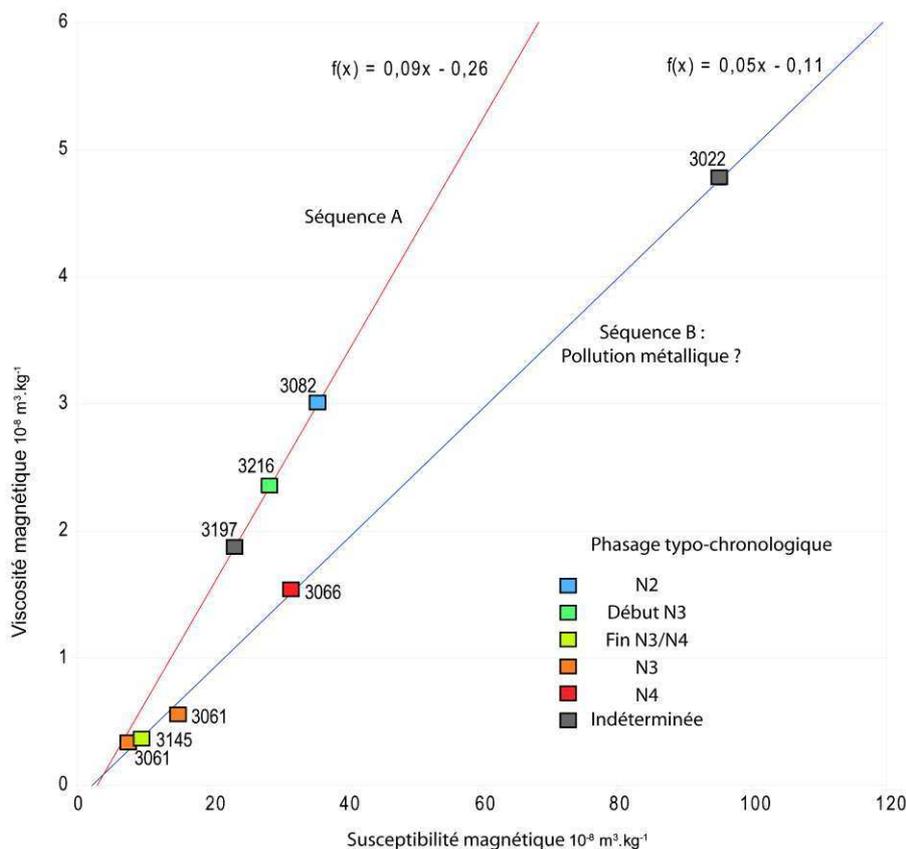


Figure 140 : Viscosité magnétique volumique en fonction de la susceptibilité magnétique volumique. Les échantillons présentent deux tendances du rapport à 5 et 9 % révélant probablement une pollution métallique pour l'occupation la plus tardive en accord avec les observations de fouilles.

Des mesures ont également été effectuées in-situ sur la surface des structures décapées. L'anomalie très magnétique dont la cause n'a pu être identifiée sur le terrain ne présente pas de contraste d'aimantation induite, une aimantation rémanente doit donc lui être associée, ce qui pose le problème de la nature de cette aimantation. Des mesures ont aussi été réalisées sur les structures et à l'intérieur des bâtiments sur poteaux. Les valeurs à l'intérieur des bâtiments ne sont pas dissociables de celles du substrat, de l'ordre de $5 \cdot 10^{-5}$ u.S.I. contrairement au comblement des structures, de l'ordre $20 \cdot 10^{-5}$ u.S.I. Ces mesures n'ont donc pas révélé de niveaux d'habitat à l'intérieur des bâtiments qui auraient pu échapper aux fouilleurs. Le puits, quant à lui, est aussi magnétique que les fonds de cabanes, avec des valeurs corrélées à celles observées sur échantillon dans le fond des structures.

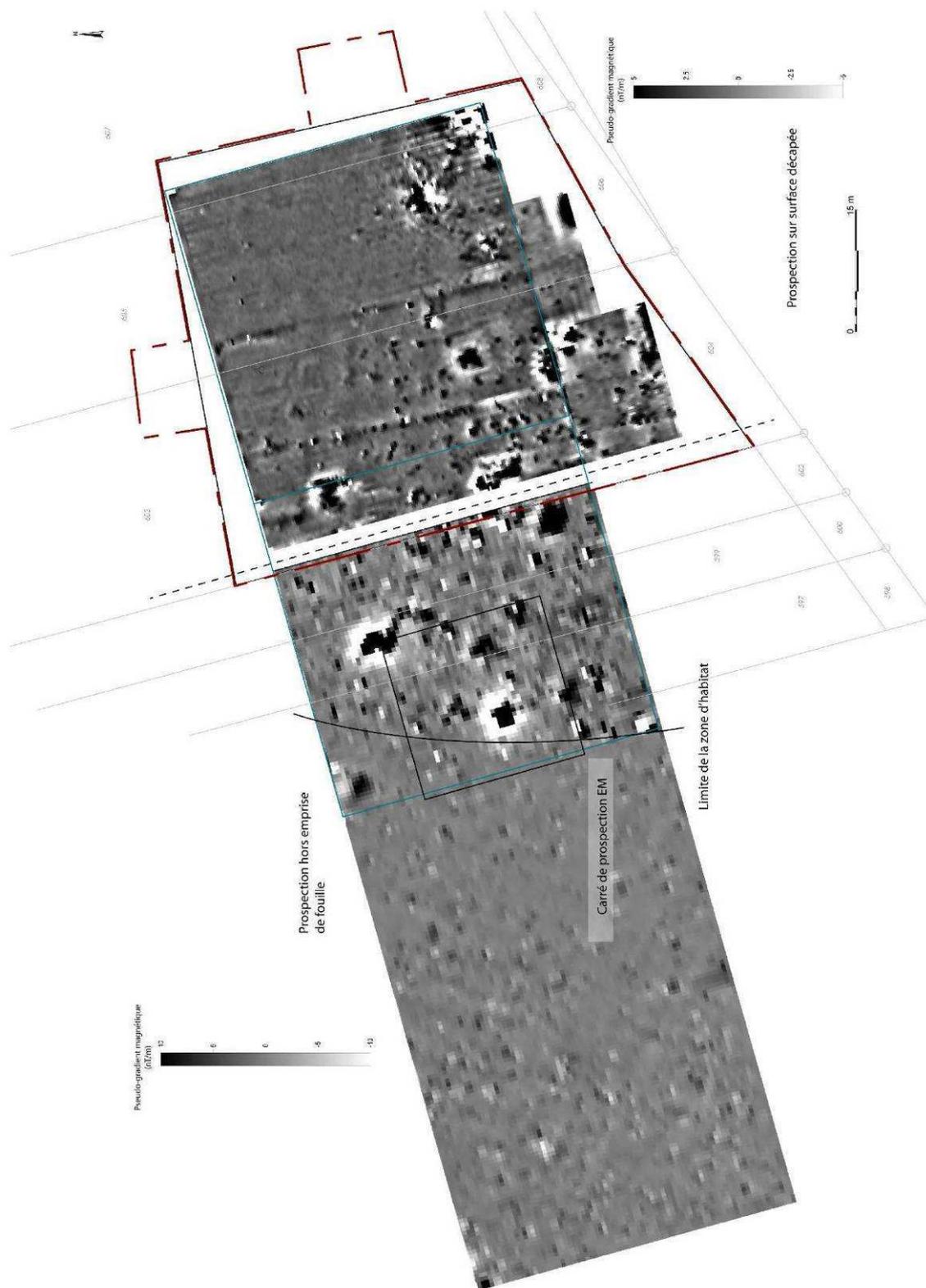


Figure 141 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre sur la surface décapée avec un écartement entre profil de 50 cm et à la surface avec un écartement entre profil de 1 m.

6.2.4.3 Etude de l'extension du site d'habitat

Les résultats de mesures magnétiques sur la surface décapée ont prouvé le fort potentiel de l'outil sur ce site et dans ce contexte sédimentaire et archéologique particulier (fig. 141). Les fortes valeurs de susceptibilité des structures présentent des contrastes suffisants à une détection en surface, avec seulement 40 cm de recouvrement dans ce cas précis.

Par contre, la taille des plus petites structures ne paraît pas toujours suffisante pour pouvoir les détecter à 40 cm, surtout si le niveau superficiel de terre est pollué par des éléments céramiques. La maille utilisée pour réaliser les mesures est de 1 m entre les profils. Il est alors envisageable de détecter des structures de l'ordre du mètre. Un maillage plus fin permettrait probablement de détecter des structures de plus petites tailles mais alors plus proches de la surface. La profondeur des structures et un comblement peu marqué (sans céramique, métal, etc.) pourraient entraîner la formation d'une anomalie trop faible par rapport au niveau de bruit en surface. Ce bruit est proche de 3 nT/m alors que l'anomalie générée par une structure de 1 m par 1 m avec un comblement présentant un contraste de susceptibilité avec l'encaissant de $10 \cdot 10^{-5}$ u.S.I. entraîne à 40 cm de la surface la formation d'une anomalie de seulement 2 nT/m qui peut simplement être multipliée par 2 si on tient compte de l'aimantation visqueuse.

Carte des aimantations magnétiques

A l'est, en bordure immédiate de l'emprise, la prospection magnétique couvre un rectangle de 40 m par 60 m. Un ensemble d'anomalies faiblement magnétiques non dissociables permet de reconnaître l'extension du site qui s'étend sur une bande de 30 m, le long de l'emprise, avec une limite nette suivant un axe nord-sud (fig. 141).

Plusieurs anomalies magnétiques sont clairement visibles et correspondent probablement à des fonds de cabane. On observe entre la surface décapée et la partie hors emprise une importante différence d'amplitude du signal magnétique. Alors que sur la surface décapée les anomalies magnétiques ont une amplitude moyenne de 10 nT/m (-3/7 nT/m), hors emprise le signal magnétique est plus fort avec des amplitudes de 20 nT/m pour les anomalies très magnétiques et 10 nT/m pour les anomalies courantes. Deux anomalies sont beaucoup plus marquées que les autres : leur signature est en effet orientée Nord-Sud et elles ont de fortes amplitudes. Il pourrait s'agir de structures rubéfiées en place.

La hausse d'amplitude du signal magnétique entre la surface décapée et la parcelle non décapée n'est pas conforme à ce que l'on attendrait. Le niveau de terre arable en surface étant censé diminuer l'intensité du signal puisqu'a priori homogène et tabulaire, il oblige simplement à éloigner le capteur des structures. Le prolongement des structures par des fantômes à l'intérieur de la couche superficielle pourrait expliquer cette différence. Une série de mesures électromagnétiques a été

effectuée pour renseigner l'aimantation des structures sur une profondeur donnée et permettre de répondre à ces questions (Tabbagh 1984).

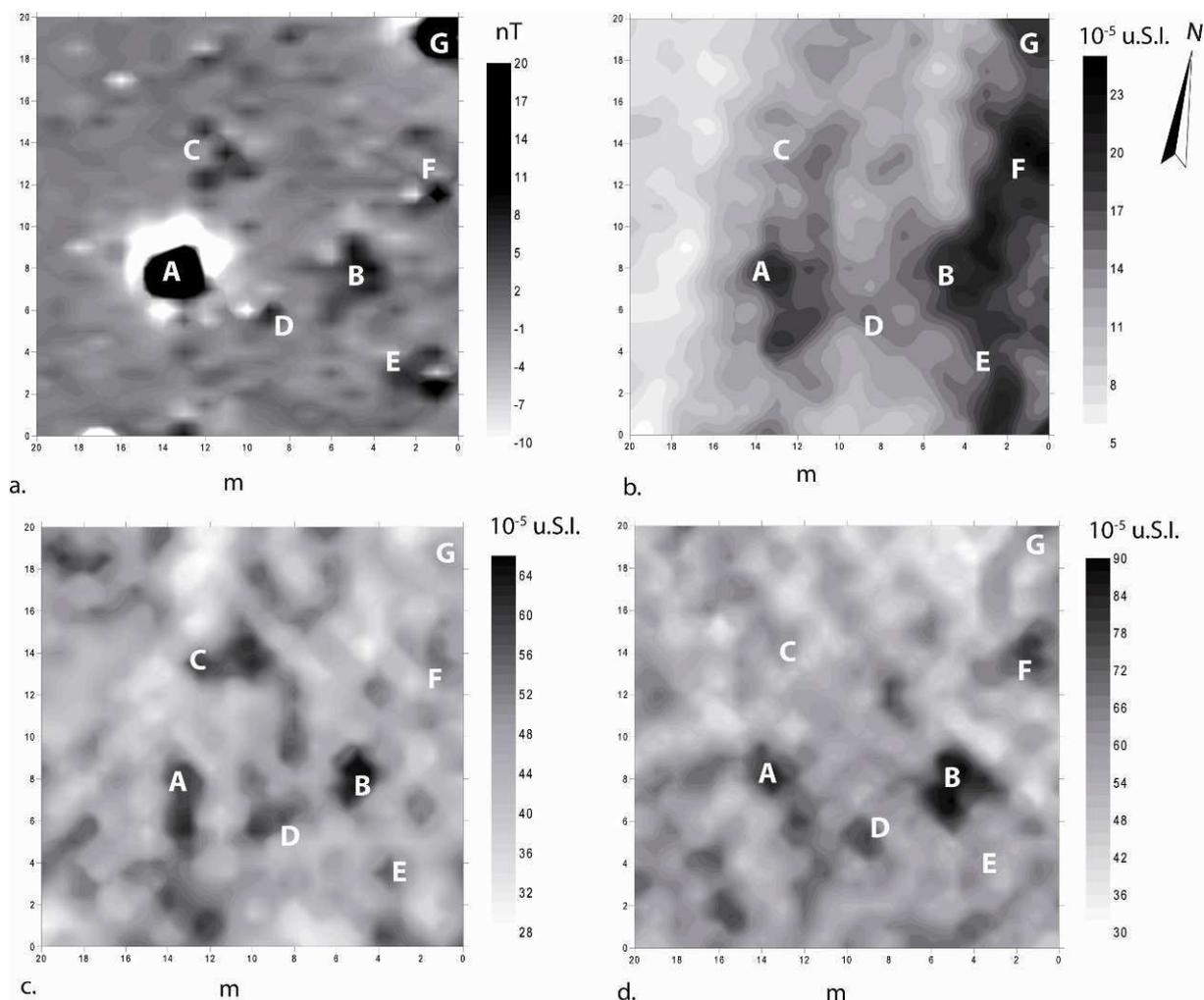


Figure 142 : a. Carte des anomalies du champ magnétique terrestre sur la zone test, b. Carte de la susceptibilité magnétique apparente (MS2D), c. Carte de la susceptibilité magnétique apparente (CS60 mode VCP), d. Carte de la susceptibilité magnétique apparente (CS60, mode VVCP)

Cartes de la susceptibilité magnétique apparente

Les mesures électromagnétiques réalisées avec le CS60 ne couvrent qu'une surface carrée de 20 m de côté (fig. 142), centrée sur plusieurs anomalies magnétiques dont deux fortement magnétiques. Les mesures ont été réalisées avec le CS60 avec deux configurations : VCP et VVCP. La position VVCP possède une profondeur d'investigation légèrement plus faible que la position horizontale mais son pouvoir de résolution latérale est plus élevé (Thiesson *et al.* 2011). Les trois anomalies ont pu être reconnues sur les deux cartes de susceptibilité magnétique (fig. 142). La carte de susceptibilité à partir du CS60 VVCP donne plus de détails, probablement à cause de son pouvoir de résolution, mais avec les deux configurations, on observe clairement les différentes anomalies

reconnues en prospection magnétique. Une part du signal est donc contenue dans les 40 premiers cm de sol. Cette observation ne suffit pas à prouver l'existence des structures en place dans les niveaux superficiels, puisqu'il pourrait s'agir d'une hausse de la susceptibilité due à des brassages de niveaux plus profonds.

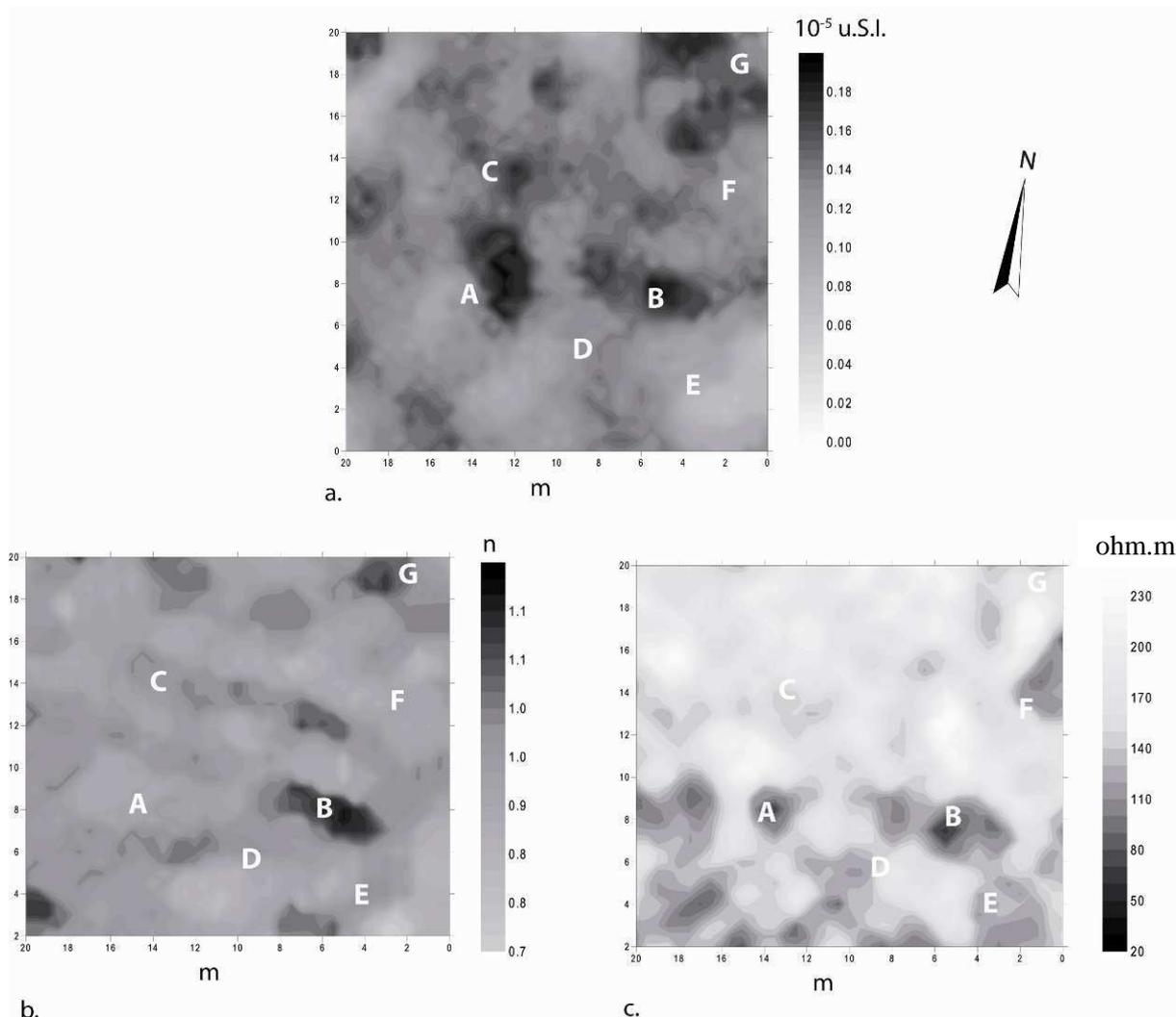


Figure 143 : a. Carte de la viscosité magnétique apparente (VC100 au temps de coupure 24 μ s), b. Calcul du paramètre n de décroissance (suivant la forme $A^{t/n}$) de la viscosité magnétique en fonction du temps c. Carte de la résistivité électrique apparente (CS60 mode VCP)

L'existence de contraste de susceptibilité magnétique dans les niveaux décapés concorde d'ailleurs avec la carte du MS2 (fig. 142) qui avec une profondeur d'investigation de 10 cm maximum présente déjà une partie des anomalies, mais cette fois-ci avec des valeurs de susceptibilité beaucoup plus faibles (contraste de $10 \cdot 10^{-5}$ u.S.I.). Sur les cartes de susceptibilité magnétique du CS60 VCP, les ordres de grandeur des contrastes sont plus élevés mais l'appareil est calibré manuellement et il est donc difficile d'affirmer que cet étalonnage soit parfaitement exact en absolu. L'opérateur est en effet fortement contraint par l'électronique de l'appareil, son calibrage étant délicat à cause des déformations subies lors son déplacement.

Des mesures de viscosité ont donc été effectuées avec le VC100 pour estimer la part d'aimantation visqueuse dans les 40 premiers centimètres.

Carte de la viscosité magnétique

Sur les quatre voies exploitables de la viscosité magnétique on distingue les anomalies identifiées sur les cartes de susceptibilité magnétique et d'anomalies magnétiques (fig. 143). Les mesures de viscosité réalisées ont d'abord une signification relative (un étalonnage réalisé sur site calant seulement l'ordre de grandeur). A partir de ces mesures de viscosité magnétique à différents temps de coupures, on a pu mesurer la pente de décroissance due au signal de viscosité en fonction du log du temps suivant la forme t^{-n} .

On observe alors que trois anomalies (les moins magnétiques sur les cartes de pseudo-gradient du champ magnétique terrestre) montrent que le paramètre n (qui caractérise la pente) cartographié ici est assez élevé, et présente donc une distribution non plate des tailles des grains magnétiques présents dans les structures. L'anomalie la plus magnétique doit, en revanche, posséder une distribution plate de taille de grains magnétiques. Il est difficile de fournir une signification de l'origine de cet état de faits mais ces mesures permettent de distinguer des origines de comblement différentes.

L'existence d'une viscosité magnétique assez faible même pour les temps de coupures, les plus courts, notamment pour l'anomalie fortement magnétique, révèle que la majeure partie du signal obtenu en prospection magnétique provient de l'aimantation thermorémanente de la structure en place puisque l'anomalie est orientée suivant le champ magnétique terrestre dans une direction quasi-identique à celle de l'époque à laquelle les structures ont été mises en place. La très forte anomalie magnétique est donc probablement attribuable à des éléments magnétiques thermorémanents en place.

De même on reconnaît sur les cartes de conductivité électriques deux anomalies qui correspondent aux anomalies de viscosités magnétiques (pour deux d'entre elles) (fig. 143).

6.2.5 Conclusion

Ces observations viennent conforter l'hypothèse déjà avancée dans les premiers paragraphes de l'apparition des structures dans les niveaux (les plus) superficiels (20-25 cm). Elles concordent avec les observations réalisées à partir du CS60, qui présentent des structures très contrastées dans un niveau, on le sait par observation sur le décapage voisin, probablement assez magnétique (présence de nombreux éléments céramiques provenant sans doute des niveaux de sols ou du comblement superficiel des structures). Le site de Roeschwoog a été décapé jusqu'à une profondeur de 40 cm pour observer des structures dans le gravier brun-noir, alors qu'en réalité les structures pourraient déjà exister 20 à 30 cm plus haut, la terre végétale s'étant probablement développée dans les niveaux

archéologiques. Cette remarque sur la détermination des niveaux d'apparitions est cependant difficile à prendre en compte sur le terrain, les structures ne pouvant alors pas être observées dans les niveaux superficiels.

6.3 Horbourg-Wihr – Kreuzfeld 2 –

Le projet d'aménagement du *Kreuzfeld* au Nord-est de la commune de Horbourg-Wihr (fig. 144) a été scindé en 2 phases. Le diagnostic de la phase 1 a mis au jour une occupation gallo-romaine fouillée à l'été 2008, et celui de la phase 2, en automne 2009, la continuité de cet établissement.



Figure 144 : Carte de localisation du diagnostic de Horbourg-Wihr – Kreuzfeld 2 – en contexte péri-urbain (source IGN)

Le premier diagnostic n'a pas permis d'estimer l'importance du site, sur le plan spatial et stratigraphique, bien qu'un effort ait été porté sur les difficultés rencontrées et sur leurs conséquences probables sur l'évaluation de la densité des vestiges (Burg 2007). Les moyens initiaux alloués à la fouille qui a suivi ont été largement sous-estimés, malgré l'octroi d'une tranche conditionnelle, seule une partie du site a pu faire l'objet d'une étude fine, rendant compte d'une stratigraphie complexe. Cette fouille a fait l'objet d'une prospection magnétique sur surface décapée par *Posselt und Zickgraf Prospection*, avec le système fluxgate en pseudo-gradient magnétique avec un profil tous les 50 cm dans le but d'identifier des structures enfouies, voir d'observer des fantômes magnétiques. Cette prospection a fourni une carte très riche, malheureusement très sommairement interprétée : ce travail peu exploitable n'a donné lieu à aucune réflexion approfondie dans le cadre de la fouille, même si le potentiel de la géophysique a pu être souligné. C'est pourquoi dans la deuxième phase du projet, par

soucis de conservation de vestiges soupçonnés mais aussi afin de préciser un diagnostic potentiellement lacunaire, le SRA a prescrit dans le cahier des charges, une prospection magnétique, à l'image de celle réalisée sur la surface décapée.

C'est pour répondre à cette prescription qu'une prospection a été engagée, avec pour objectifs de déterminer l'extension du site et l'organisation spatiale des vestiges.

6.3.1 Contexte géomorphologique

Le nom *Horbourg* (château du marécage) se fait l'écho du contexte environnemental : la commune se situe en effet sur la bordure orientale de l'Ill, au Nord de la confluence avec la Thur dans la plaine d'inondation. Le site est implanté dans le champ structural du Ried gris, où domine un sol humide et riche en matières organiques, recouvert de limons post-antiques.

A l'est, la proximité de la nappe phréatique a donné naissance à un réseau de petites rivières qui viennent alimenter la Blind, cours d'eau phréatique du grand Ried Centre Alsace. Les faibles reliefs de la plaine ont entraîné une large divagation des cours d'eau, modifiant ainsi au cours du temps les tracés hydrographiques. A une période ancienne, l'Ill divaguait à l'Est de Horbourg alors que la Lauch et la Thur s'écoulaient à l'ouest, séparant naturellement les deux communes aujourd'hui réunies. Ces informations nous renseignent sur l'étroite relation entre la zone d'étude et l'importante activité hydrologique.

Sous la terre végétale, un limon brun de débordement contient quelques éléments de terre cuite et de galets roulés. Ce niveau, marqué par une forte activité biologique, fortement altéré, est sujet à des fissurations dues aux labours. Il repose sur une nappe argileuse de débordement, qui présente des traces d'oxydoréductions dues aux variations du toit de la nappe phréatique et de fait peu de traces d'activité biologique. Ces niveaux superficiels recouvrent un niveau d'occupation argileux noir d'époque antique, riche en matériel gallo-romain et en matière organique, avec un aspect microstratifié. Comme dans les niveaux supérieurs, on y trouve des tâches d'oxydoréduction. Au-dessous commencent le sable jaune et les graviers rhénans.

Avec la mise en place d'un sol de type alluvial, une vaste zone humide a succédé au comblement de plusieurs paléochenaux. Ces niveaux ont été assainis par l'apport de graviers à la période romaine. Cependant, la richesse des niveaux archéologiques laissait présager une signature des matériaux rémanents et métalliques présents dans les sédiments, « les grains magnétiques d'origine naturelle quant à eux ayant très certainement été lessivés par les battements de la nappe ».

6.3.2 Contexte archéologique

De nombreux établissements, témoins d'une dense occupation antique, sont connus à Horbourg-Wihr, seul *vicus* attesté par l'épigraphie d'Alsace. A contrario, le site paraît très peu occupé durant les périodes pré et protohistoriques et le premier Moyen-âge (Chauvin à paraître).

La fouille de la première phase a exhumé un quartier péri-urbain gallo-romain, structuré autour d'une large voie orientée Sud-Nord bordée par des bâtiments en matériaux légers. A l'arrière de ces bâtiments, on a pu observer des secteurs vides d'aménagements et de matériel mais riches en matières organiques (limons noirs). La limite nord du site pourrait être celle de l'ancien *vicus*.

Sur la seconde phase du projet, l'ensemble des structures s'organise toujours autour d'une voie large de 7 m, composée de recharges de graviers et de galets dans une matrice limoneuse indurée. Les alignements se développent perpendiculairement à la voie, et présentent une forte corrélation avec l'organisation spatiale des vestiges observés sur la phase 1. Ils sont constitués de blocs calcaires, de grès équarri, de tuiles et de galets, et tracent des parallèles distantes de 1 à 2 m. Ces amas sont les vestiges de soubassements de sablières basses en dés de pierre. Les mêmes matériaux se retrouvent dans les éléments porteurs de façades et de seuils de portes. Grâce à ces alignements, on peut restituer le plan probable de bâtiments de 5 à 7 m de côté. Des blocs de dimensions moyennes sont réparties en bordure de voie, où certaines structures sont particulièrement riches en éléments rubéfiés : torchis, charbons de bois et en résidus de fer.



Figure 145 : Vue d'une sole et d'un empierrement à proximité de la voie à Horbourg-Wihr (clichés S. Chauvin)

On note une différence sédimentaire entre l'arrière-cours des bâtiments – avec la présence d'éléments de terre cuite roulés et l'absence de galets, des limons noirs, des calages (galets, amas de galets) et des clous – et les zones environnantes, vides de marqueurs anthropiques (matériaux, structures). Au plus près de la voie, le niveau antique, qui repose sur 10 cm de limons argileux noirs, présente une puissance de 1,1 m, avec une fosse de rejets et des structures de combustion (fig. 145). Il peut être suivi jusqu'à 15 m de la voie.

La carpologie peut être utilisée pour déterminer la nature et la fonction de certains espaces et de certaines structures. En effet, les marqueurs paléobotaniques sont liés aux pratiques et à la gestion de l'organisation des zones jardinées ou cultivées jouxtant les bâtiments.

6.3.3 Les données géophysiques

6.3.3.1 Résultats généraux

La carte de prospection magnétique a été réalisée avec des profils distants de 1 m sur une surface de 3 hectares (3 jours de prospections), dans un milieu actuel péri-urbain où de nombreuses pollutions métalliques ont formé un bruit de surface sur les données magnétiques, effet qui a pu être atténué par l'application d'un filtre par la médiane et d'un écrêtage des données les plus fortes. L'existence d'anomalies de fortes amplitudes rend cependant malaisée l'obtention de résultats traités non affectés par ces filtres.

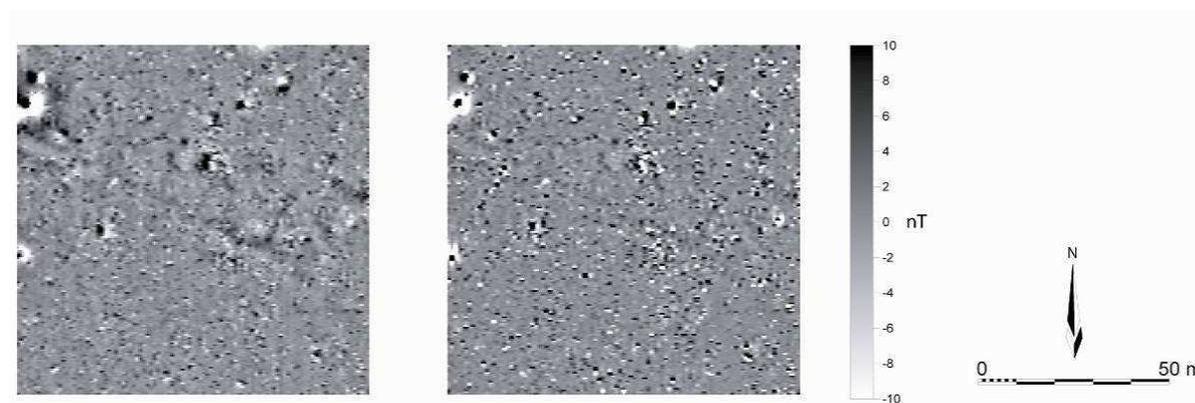


Figure 146 : Comparaison des résultats entre à droite, la carte d'anomalie de l'intensité totale du champ magnétique terrestre et à gauche la carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre. Les anomalies ne sont clairement visibles que sur la première carte.

Dans la suite de ce qui avait été réalisé sur la surface décapée par *Posselt und Zickgraf*, les mesures ont été effectuées en pseudo-gradient vertical du champ total (fig. 146). Elles n'ont pas permis d'obtenir des données lisibles mais seulement un bruit de surface. La cartographie du champ total enregistré sur le capteur du bas fournit une carte plus lisible, où apparaissent des anomalies apparemment structurées. La différence entre les deux modes de prospection peut provenir de la sensibilité des deux configurations : plus la source de l'anomalie est profonde, plus les intensités de l'anomalie mesurée sur le capteur du bas et le capteur du haut seront proches, la diminution du signal magnétique se faisant à l'inverse du cube de la distance pour les structures massives. De fait, les capteurs à sondes 'fluxgate' conçus pour mesurer une différence de la composante verticale du champ sur un écartement de 65 cm (pour les sondes Foerster) permettent difficilement de rendre compte de

structures profondes. La qualité de l'information obtenue ici est donc étroitement liée au type de magnétomètre utilisé.

6.3.3.2 Discussion sur l'origine des anomalies linéaires.

En sus de nombreuses anomalies locales repérées en prospection qui sont le produit de structures au comblement magnétique, les données géophysiques présentent de nombreuses anomalies linéaires (fig. 147).

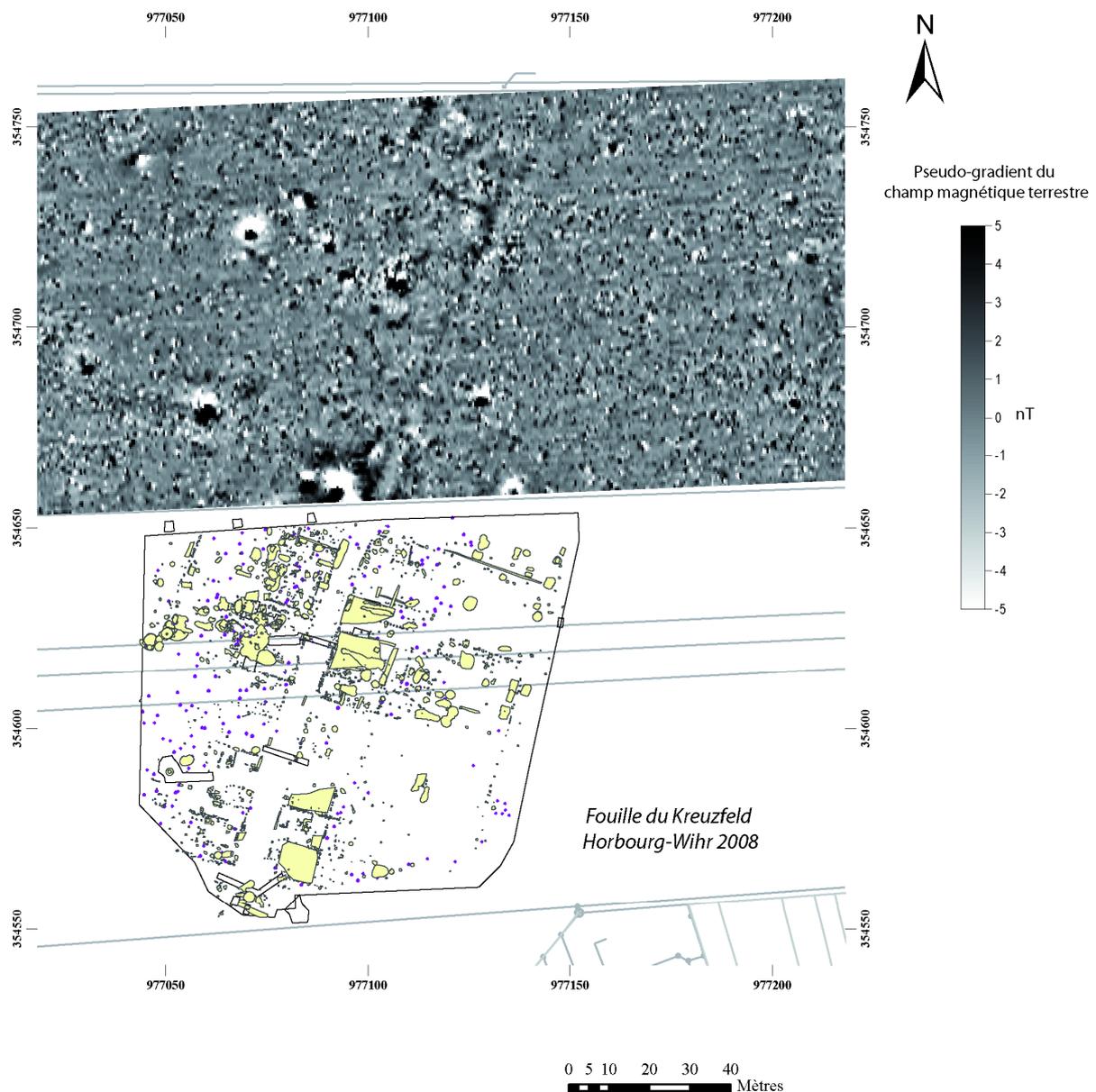


Figure 147 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre sur Kreuzfeld 2 avec le plan de la fouille Kreuzfeld 1 voisine au sud qui révèle les organisations principales que l'on retrouve au nord avec les anomalies géophysiques (fond P. Flotté)

Le terrain, d'après l'étude de ses caractéristiques géomorphologiques, génère sans doute un signal magnétique très faible. Les anomalies ne sont donc probablement pas dues à l'aimantation des sédiments comblant les structures. De même, mis à part les fossés bordiers de la voie, aucune structure linéaire excavée n'a pu être clairement identifiée dans les sondages mécaniques, à l'inverse des alignements de matériaux plus épars (grès équarris, tuiles, blocs de pierre, etc.). Or l'éparpillement des matériaux composant ces faits rend impossible la formation d'anomalies linéaires. Par contre, on a pu observer une forte variabilité dans la richesse des niveaux archéologiques : une forte concentration en matériaux magnétiques (éléments de terre cuite, éléments métalliques fins, etc.), variant d'une zone à l'autre, a pu entraîner des différences d'aimantations d'une couche à l'autre. Si la rupture entre deux couches est verticale – comme on peut l'imaginer dans un secteur d'habitat avec un cloisonnement apparent – les différences de propriétés magnétiques entre les niveaux vont être à l'origine des anomalies linéaires observées sur les cartes. Cette hypothèse nous permet de délimiter des zones en fonction de leurs caractéristiques magnétiques et donc des pollutions de sol (terre cuite, etc.)

Perpendiculairement à la voie on distingue de nombreuses anomalies linéaires (fig. 148), peut-être le parcellaire délimitant les îlots repérés lors de la fouille de 2008 (Flotté à *paraître*). Plusieurs de ces anomalies recoupées par les tranchées correspondent à des alignements de blocs et de matériaux. Autour d'elles se répartissent sans organisation apparente des anomalies locales proches de la voie principale, probablement les fosses et les foyers. La richesse des matériaux magnétiques à proximité de la voie a également produit une coalescence entre les différentes anomalies. Les derniers éléments remarquables sont les anomalies zonales causées par les concentrations de matériaux magnétiques. Elles révèlent des zones potentiellement riches en structures ou des nappes de matériaux, souvent situées à proximité de la voie.

Un prolongement vers le haut de 0,8 m a mis en évidence ce qui pourrait être une voie secondaire orientée Est-Ouest, parfaitement perpendiculaire à la voie principale. Des anomalies linéaires très faibles s'organisent perpendiculairement à cette dernière, sans pour autant présenter un nombre de structures aussi important que pour la voie principale. Le fait que cette potentielle voie secondaire n'ait pas été observée dans les tranchées peut s'expliquer par un manque de contraste visuel entre le remplissage et la structure.

Les prospections magnétiques nous apportent plus d'informations qu'une simple détection de vestiges sur des secteurs d'occupation ou d'habitat plus ou moins denses, où la richesse du matériel magnétique (terre cuite, éléments métalliques, etc.) révèle une organisation spatiale dont la fouille seule, à du mal à rendre compte (fig. 149). L'approche géophysique associée aux diagnostics – ou dans ce cas précis à la fouille – est d'un intérêt avéré puisqu'elle fournit à l'archéologue des informations spatiales utiles à l'élaboration d'un protocole qui permette d'appréhender la fonction des espaces. Un habitat similaire a été cartographié par *Posselt und Zickgraf* sur le *vicus* de Biesheim. On peut y observer la même trame urbaine, avec des anomalies perpendiculaires aux voies principales, dans un contexte géologique sensiblement similaire : le site est localisé dans le Ried sur des niveaux

argileux résultant des dépôts alluviaux fins. Le signal magnétique pourrait de fait aussi provenir du type des pollutions des sols en matériaux magnétique (les structures sont cependant plus conséquentes et plus aisément détectables sur les lieux publics, de par l'utilisation de roche volcanique) (Reddé 2009).

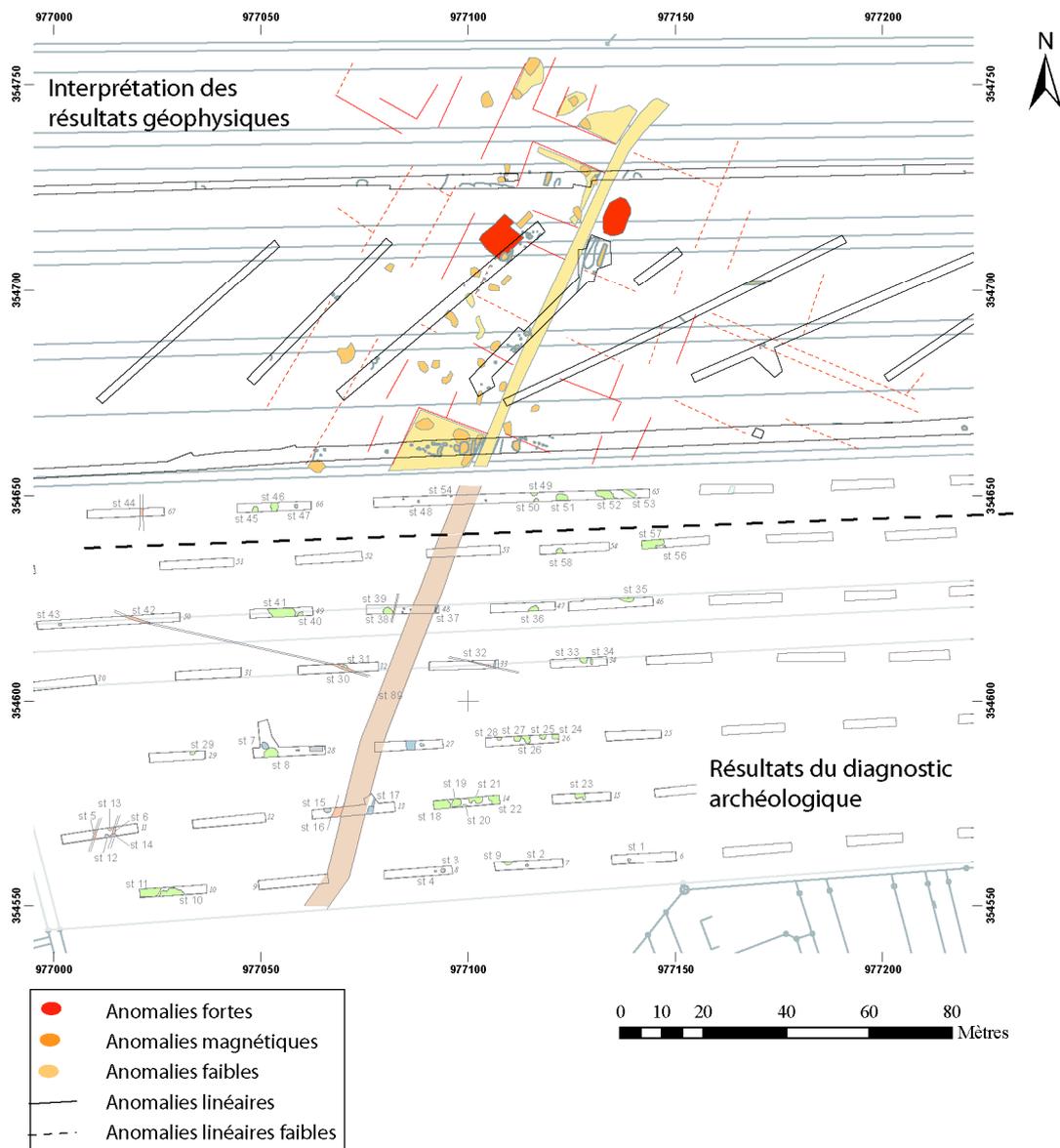


Figure 148 : Carte d'interprétation des anomalies magnétiques sur le diagnostic de Kreuzfeld superposées aux tranchées de diagnostic et aux résultats archéologiques avec au sud les résultats du premier diagnostic qui n'avait permis de repérer que la voie principale et quelques alignements. (fond F. Burg et S. Chauvin)

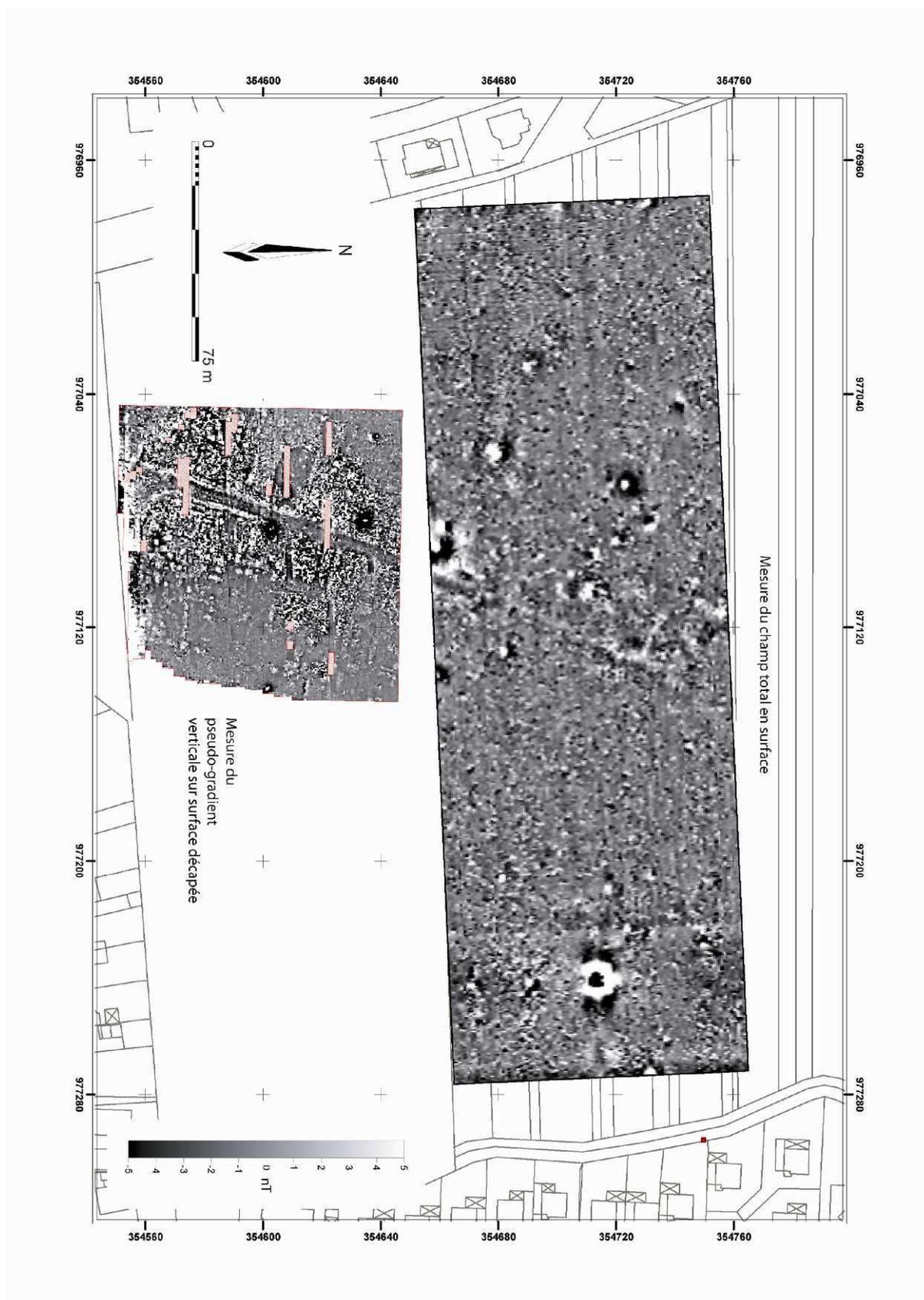


Figure 149 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre au nord (PAIR, magnétomètre champ total, 1 m entre profil) avec les résultats de la prospection magnétique PZP, (gradiomètre fluxgate, 0.5 m entre profil) sur surface décapée sur la fouille de Kreuzfeld 1.

7 Les sites de plaine – les débouchées de vallées.

7.1 Dambach-la-Ville – Plateforme Départemental d'Activité (tranche 2)

Le projet d'aménagement de la plateforme d'Alsace Centrale sur la commune de Dambach-la-Ville couvre une surface de 61 hectares. L'étude géophysique est intervenue avant le diagnostic. Les parcelles sont situées à proximité d'une zone d'activité, 1^{ère} tranche de ce projet de plateforme départementale (fig. 150). Les prospections magnétiques ont été réalisées sur 6,75 hectares, dont 5 d'un seul tenant, prospectés en été et deux zones de 1 et 0,75 hectares prospectées en hiver. La prospection électrique effectuée en été couvre quant à elle une surface de 0,27 hectare. Les parcelles et cultivées en blé, en maïs et en colza venaient d'être moissonnées, lors de la phase de diagnostic par sondages systématiques. La stratégie d'implantation de tranchées longues et en quinconce a été privilégiée afin de préserver les vestiges archéologiques au maximum et d'analyser le terrain le plus rapidement possible. Le site a été ouvert à hauteur de 9,11 %.

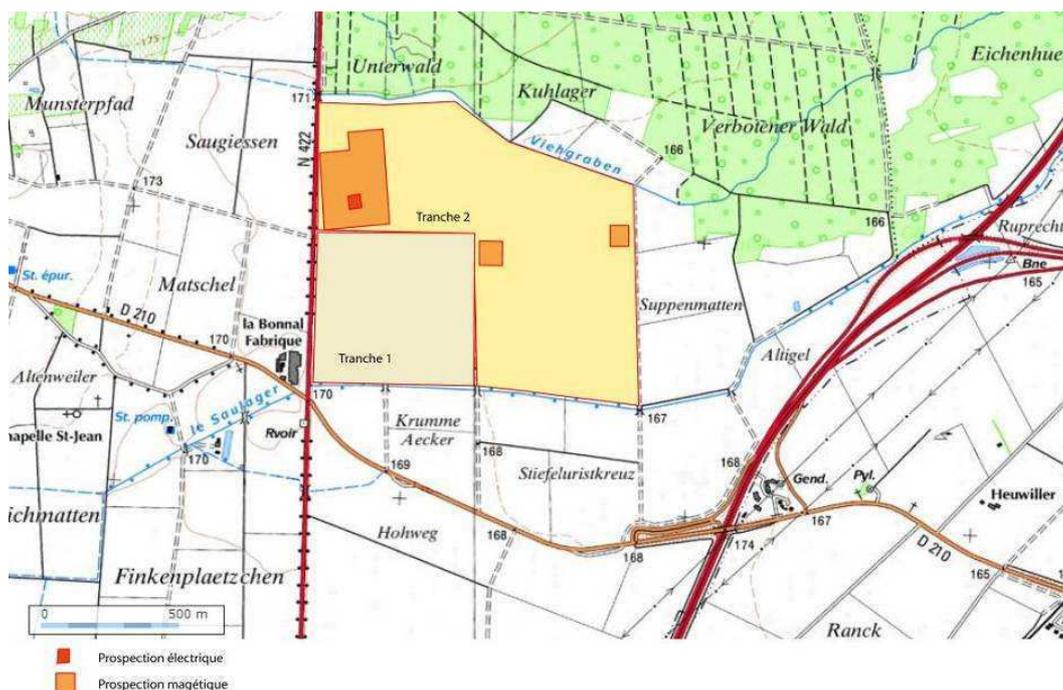


Figure 150 : Carte de localisation des différentes opérations archéologiques : diagnostic de la tranche 1, de la tranche 2 et prospections magnétique et électrique (source IGN)

7.1.1 Contexte géomorphologique

Le site est implanté dans la plaine, au pied des collines sous-vosgiennes, sur des terrains à caractère hydromorphe. Cette zone d'accumulation fluviale du Vehgraben et de la Schnee est

située à proximité d'une ancienne terrasse alluviale formée par les dépôts du piémont (galets émoussés et gélifractionnés) aujourd'hui sous couvert forestier.

On distingue sur le site les niveaux de sols type gleys ou pseudo-gleys, prenant place sur des niveaux argileux issus de l'accumulation en bordure des paléochenaux et des sols de type podzols (fig. 151), développés sur les comblements sableux de ces mêmes chenaux.

Sous la terre végétale, limono-argileuse compacte, d'une épaisseur de 30 cm, prend place un niveau sablo-limoneux blanchâtre à grisâtre homogène et compact (observé seulement dans certains secteurs), d'une épaisseur de 20 à 30 cm avec des inclusions de petits graviers et des fragments de terre cuite, ainsi que des tâches rougeâtres d'oxydoréduction. Ensuite s'étendent des niveaux d'argile sous forme lenticulaire associées à du fer à l'état réduit avec des inclusions de gravier roulés (dues aux arènes granitiques) provenant de l'accumulation des particules fines des horizons supérieurs lessivés. Le tout repose sur le substrat gravelo-sableux rhénans. Les niveaux sablo-limoneux rougeâtre entre les lentilles argileuses et le substrat gravelo-sableux rappelle dans plusieurs secteurs les dépôts d'origine vosgienne.

Dans les autres secteurs, on observe des sols argileux directement sous le niveau de terre végétale. Ces derniers, qui ne favorisent pas l'infiltration, sont caractérisés par une pédogenèse peu avancée qui donne au site un caractère hydromorphe.



Figure 151 : Vue d'un profil de podzols avec au milieu les niveaux de sables lessivés clairs (clichés F. Bonvalot)

7.1.2 Contexte archéologique

Le diagnostic a été réalisé dans le prolongement du diagnostic de 2003. Celui-ci a conduit à une fouille en 2006 sur une zone d'artisanat antique où des fours de céramique et des fours de tuilier ont été découverts (Kuhnle 2006). Ce secteur a dès lors été identifié comme un grand centre rural antique de production de céramique. Un autre site antique de production de céramiques a été fouillé en 2008, à un kilomètre de distance. Ces vestiges antérieurs à l'occupation médiévale du village étaient les seuls connus sur la commune de Dambach.

Le diagnostic de 2010 a mis au jour 600 structures (fig. 152) réparties sur les 60 hectares, dont plusieurs ont pu être datées. Une occupation néolithique datée du BORS couvre 10 à 11 hectares potentiels : des structures excavées et des zones d'épandage de mobilier lithique et céramique y ont été identifiées (Bonvalot 2010). L'occupation néolithique se caractérise par un niveau stratigraphique important et riche en matériel, qui devient discontinu pour les occupations postérieures. Ces discontinuités rendent la compréhension du fonctionnement de ces niveaux très complexe. Le diagnostic a mis en évidence quelques vestiges antiques, peut-être en lien avec le centre artisanal, ce qui permettrait de circonscrire la zone d'activité gallo-romaine. Quelques structures sont également datées de l'époque médiévale. Sur l'ensemble de la zone diagnostiquée on a pu observer un réseau très dense de fossés, dont certains sont attribuables à l'époque contemporaine. A ce réseau est associé un système parcellaire ancien qui s'organise suivant le réseau découvert sur le premier diagnostic. Enfin apparaissent des paléochenaux bordés par des zones humides, qui ont pu jouer un rôle dans les schémas d'occupation du site : hypothèse qu'il faudra vérifier lors de la fouille.



Figure 152 : Vue des trous de poteaux découverts lors des tranchées de sondages systématiques. Le comblement argileux des structures ne présente pas de différence de contraste avec le substrat argileux. (clichés F. Bonvalot)

7.1.3 Discussion géophysique

Prospection magnétique

Les prospections antérieures (Kuhnlé 2004) réalisées entre les différentes fenêtres de la fouille de 2006, avaient permis de détecter des fours, des épandages de matériaux et des structures ainsi que des linéaments attribués aux comblements de paléochenaux. La prospection magnétique a été engagée dans la continuité de cette première étude géophysique où les secteurs présentant de fortes anomalies magnétiques avaient été interprétés comme des extensions des zones d'activité artisanales. L'objectif de la prospection magnétique sur la deuxième phase du projet était de détecter la présence de fours de potiers et de tuiliers gallo-romains, à l'image de ce qui avait été observé sur la première tranche du projet d'aménagement. Sur cette deuxième tranche, la géophysique s'est avérée inopérante. Les 6,75 hectares de prospection magnétique présentent un niveau de bruit très élevé dû à des objets en fer en surface, et l'absence d'anomalie de plus faible amplitude qui aurait pu être correspondre à des structures archéologiques (fig.154).

Plusieurs hypothèses viennent expliquer ce fait. Premièrement, les vestiges néolithiques sont majoritairement de petite taille (trous de poteaux, etc.). Néanmoins, le recouvrement des structures étant assez faible, leurs dimensions n'expliquent pas l'absence d'anomalie magnétique : certaines structures comme les fossés auraient du être repérées, tout comme les nappes de matériaux magnétiques (terre cuite). De même, si les vestiges en creux comblés naturellement par des niveaux de terre superficielle ne sont pas magnétiques à cause du contexte hydromorphe, les nombreux épandages auraient très bien pu être détectés par la méthode magnétique à condition que leurs bordures soient suffisamment marquées.

Deuxièmement, il a également été observé que les podzols ne favorisaient pas les contrastes magnétiques, les sables ne contenant pas assez de particules fines porteuses du signal (Marmet 2000). Malgré tout, de faibles contrastes existent tout de même dans ce type de contexte, et l'association du comblement de certaines structures avec des matériaux magnétiques aurait très bien pu entraîner des anomalies magnétiques. Les concrétions ferrugineuses dans les niveaux inférieurs dus au lessivage des niveaux supérieurs de sols n'ont pas entraîné d'anomalies. Elles ne présentent pas de signal magnétique particulier. Elles semblent se comporter plutôt comme des paramagnétiques (Marmet ...), avec une aimantation insuffisante pour créer des anomalies telles que celles observées sur les cartes magnétiques.

L'existence d'une pollution métallique de surface est l'hypothèse la plus probante pour expliquer les nombreuses anomalies ponctuelles. Elle est à mettre en relation avec l'épandage de tri

compostage sur l'ensemble du terrain (sources orales), et avec les observations effectuée par *Posselt und Zickgraf* sur la prospection réalisée au cours du diagnostic Willmstein (fig. 153) (Schneikert, 2007). Cette dernière implantée d'après des a priori sur l'existence de fours de potiers, a été mise en œuvre sur un terrain en jachère, en limite d'une zone d'épandage moderne et d'un terrain cultivé, couvrant alors l'emprise du diagnostic. Sur le terrain cultivé, le niveau de bruit masque jusqu'à la réponse des fours découverts au diagnostic. Il est équivalent à celui rencontré sur notre projet. Ces résultats avec des anomalies très ponctuelles et très fortes dues à des éléments métalliques exogènes et probablement contemporains en surface, posent le problème de l'interprétation de la première opération, où les secteurs bruités ont été associés à la présence de vestiges. Le lissage des points faux aurait pu entraîner une atténuation du bruit ponctuel et la formation de conglomérats, formant des anomalies plus diffuses. Les interprétations de cette opération sont donc, d'après les observations récentes, à revoir. L'interprétation reste cependant valable pour les anomalies identifiées comme des fours.

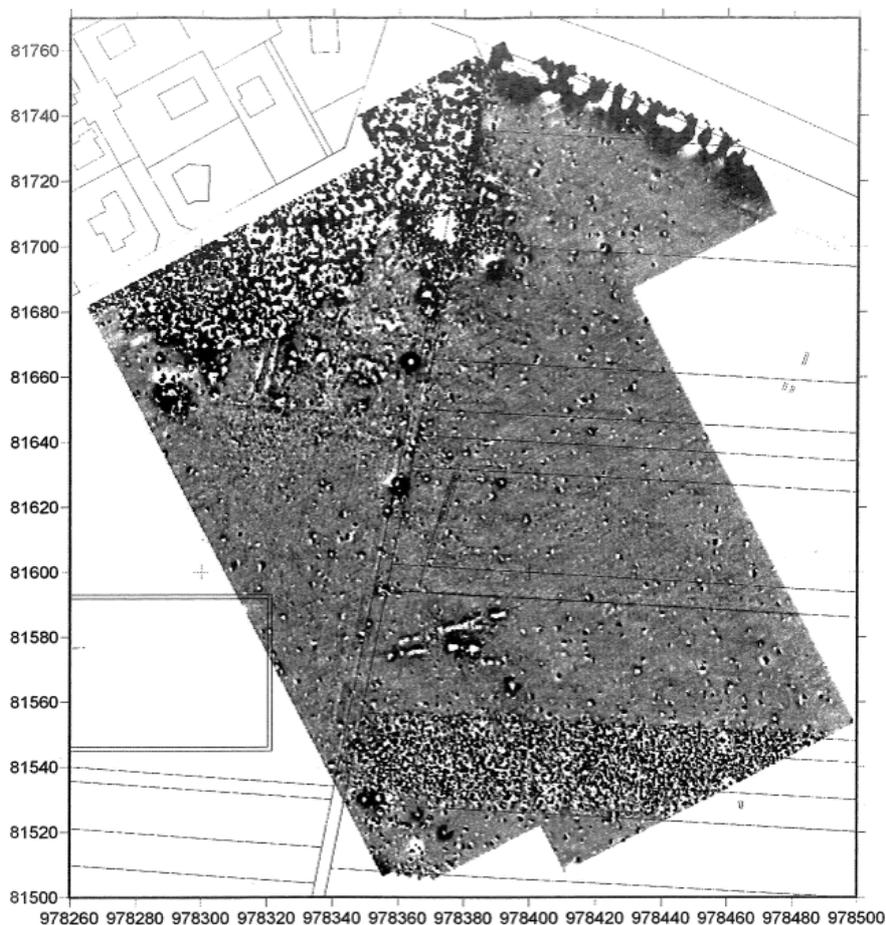


Figure 153 : Prospection magnétique au lieu-dit Willmstein, par PZP, avec un gradiomètre fluxgate et un espacement entre profil de 50 cm. Au sud une parcelle se détache du reste du terrain par le niveau de bruit très important qu'il présente. Ce niveau de bruit rappelle le niveau de bruit observé sur la prospection (Posselt und Zickraf Prospektion).

Une prospection électromagnétique à maille large, pour cartographier la susceptibilité magnétique aurait sans doute permis d'estimer l'extension du site. Ces mesures auraient du être effectuées avec un appareil Slingram moins sensible aux éléments métalliques très proches de la surface (VCP) et qui possède des profondeurs d'investigations plus importantes que les appareils à boucles.

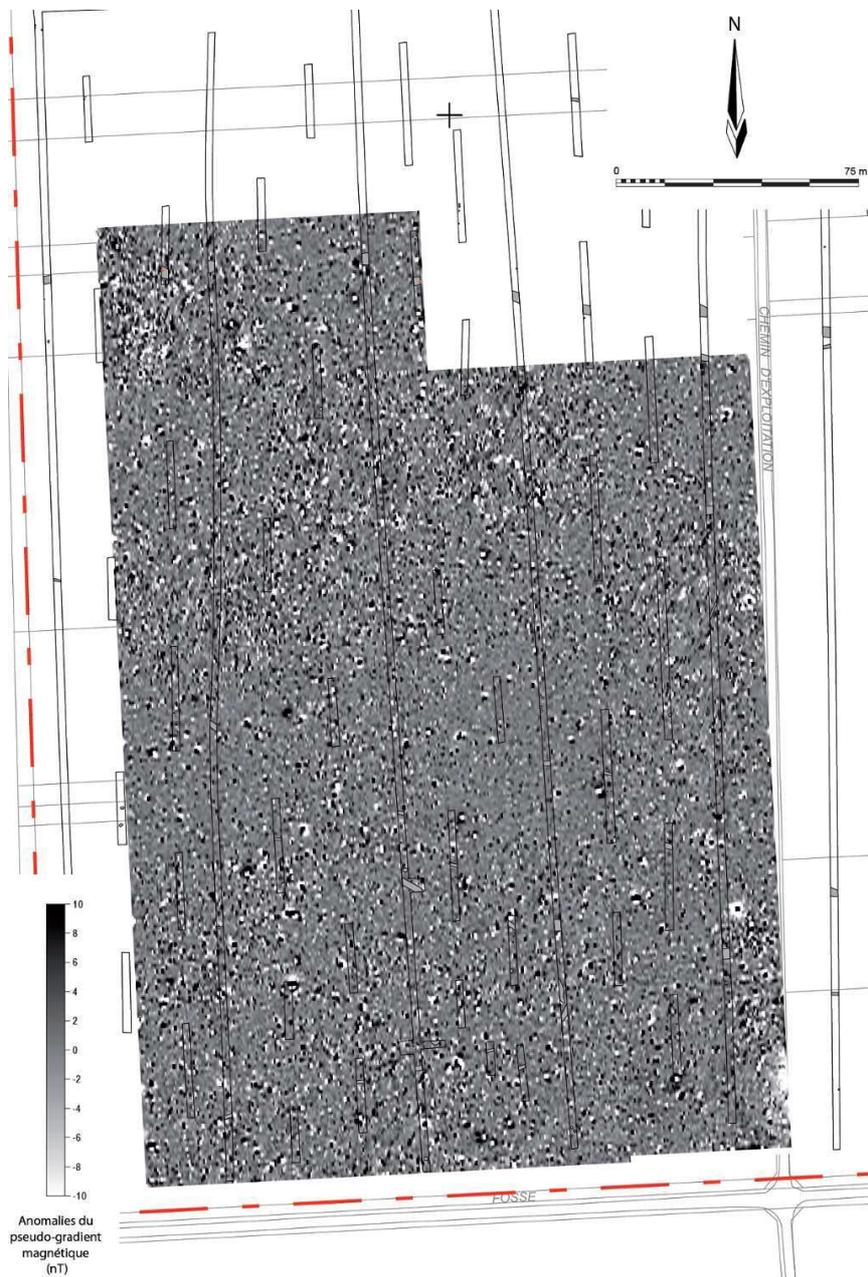


Figure 154 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre. Le niveau de bruit de ce terrain est très fort et probablement causé par de nombreuses pollutions en fer liées à des pratiques agricoles. Ce bruit empêche la détection de toute structure archéologique (d'après F. Bonvalot)

Prospection électrique

Une prospection électrique a été effectuée sur une surface beaucoup plus restreinte (fig.155). Un important chenal résistant a été mis en évidence ainsi que deux anomalies linéaires résistantes, découvertes qui concordent avec les observations du diagnostic. Ces anomalies ont été par six fois recoupées par les tranchées mais n'ont été observées que trois fois.

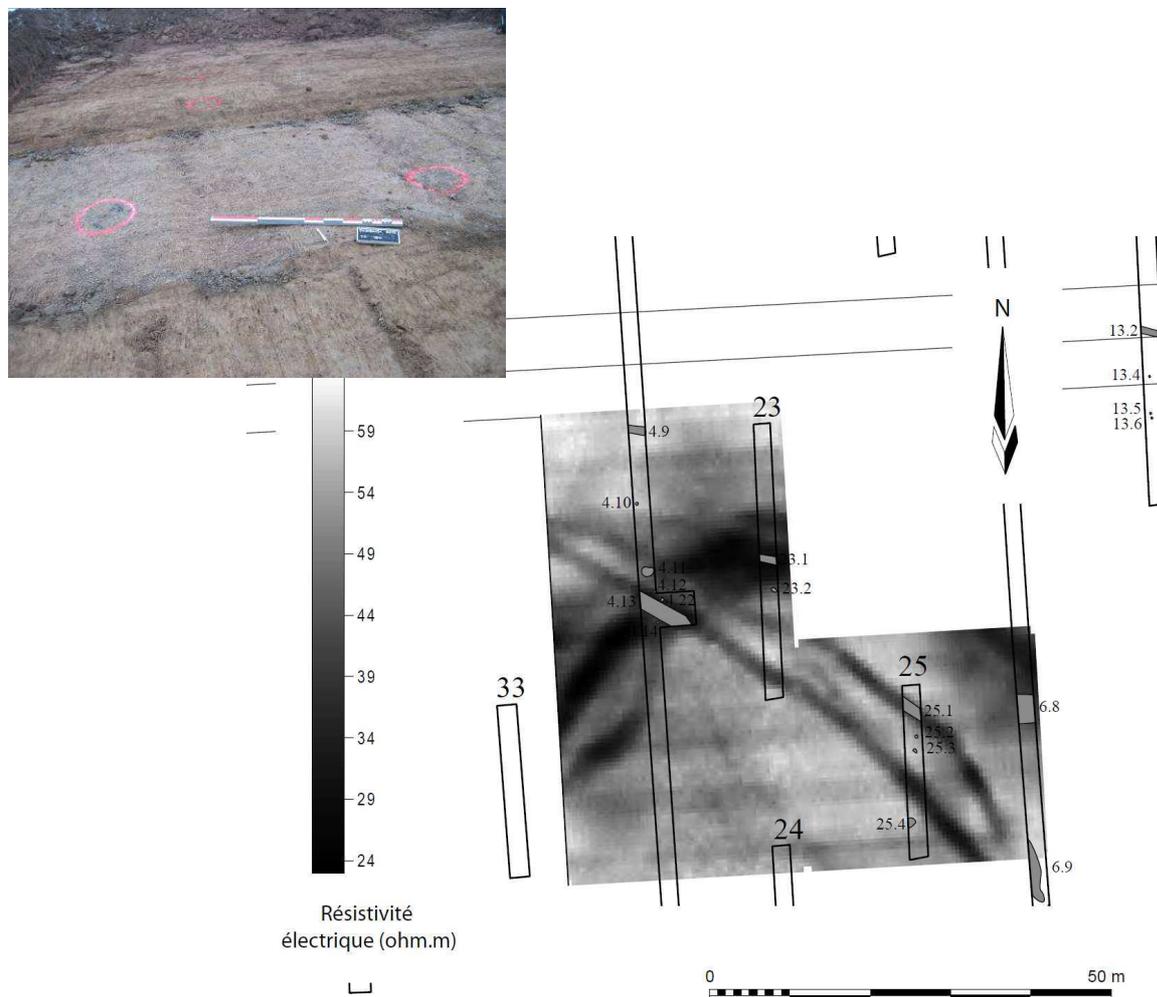


Figure 155 : Carte de résistivité électrique apparente pour un écartement d'électrode de 50 cm en configuration twin probes. Les fossés ne sont repérés que deux fois au lieu de six (clichés F. Bonvalot, DAO F. Bonvalot)

Une seconde ouverture a donc été effectuée : les anomalies se sont avérées d'origine naturelle au vu de leurs comblements de graviers fins, plus résistants que les niveaux conducteurs d'argiles de l'encaissant. La corrélation des données a permis de lever le doute sur leur identification. Une prospection électrique sur une plus grande surface aurait mis au jour le système parcellaire. La méthode électromagnétique particulièrement adaptée aurait du être privilégiée et aurait permis de détecter les fossés sur les secteurs argileux.

Ce site met en évidence l'importance et l'influence des a priori sur l'estimation de l'efficacité de la géophysique, la prospection magnétique ayant été engagée par soucis d'efficacité au vu des

résultats obtenus sur les parcelles voisines alors qu'elle semble ici la moins adaptée à la détection des vestiges.

7.2 Soultz – Florival –

La prospection géophysique réalisée dans le cadre de l'opération de Soultz-Florival avait pour objectif de détecter des vestiges entre la zone d'habitat rubanée et le fossé circulaire découvert plus à l'est, non prescrit en fouille, qui aurait pu échapper aux mailles des tranchées de diagnostic (fig. 156). Des mesures de susceptibilité à larges mailles ont été mises en œuvre afin de rendre compte des variabilités de susceptibilité magnétique et de conductivité magnétique dans les niveaux de sols superficiels sur une parcelle adjacente à la fouille. Une prospection a été menée sur la surface décapée dans le but de repérer des structures invisibles sur les sites rubanée et protohistorique.

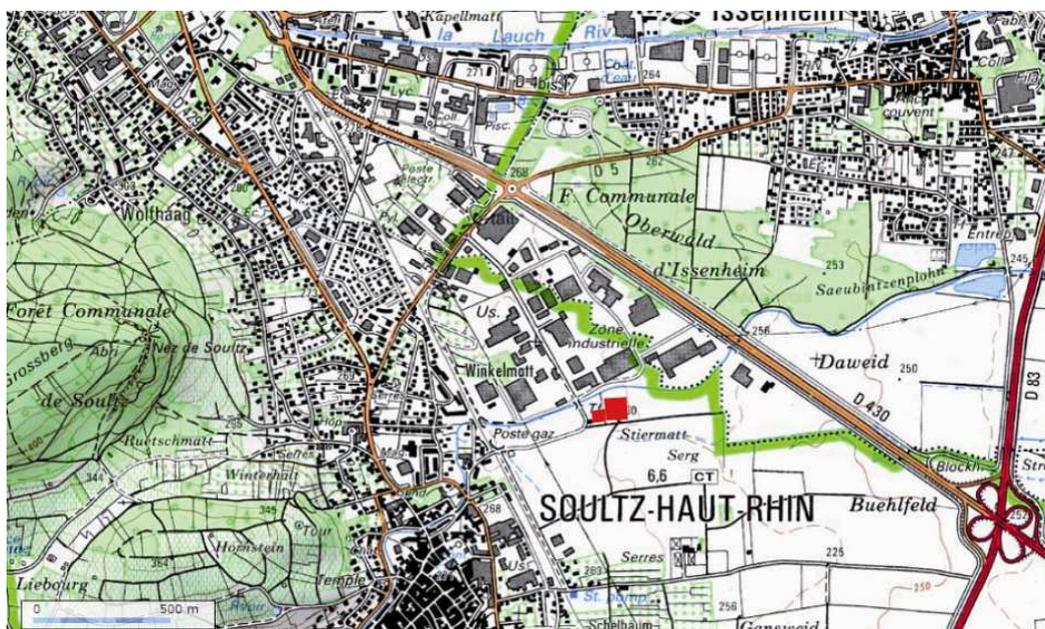


Figure 156 : Carte de localisation de l'opération de Soultz Haut-Rhin –Florival-(source IGN)

7.2.1 Contexte géologique

Le site est localisé au débouché de la vallée de Guebwiller, sur le cône de déjection de la Lauch formé d'alluvions holocènes gravelo-sableuses et limoneuses du massif vosgien. Des plaquages de lœss déposés sur cet ancien cône de déjection ont entraîné sur le site la formation de colluvions lœssiques. Le faible relief a favorisé la divagation des cours d'eau (ruisseau au Nord).

En surface, le niveau de terre végétale est composé d'une matrice argileuse avec des inclusions de charbons, de terre cuite et de graviers (fig. 157). Il repose sur un niveau de limons argileux avec des inclusions de gravillons, de nodules de ferromanganèse et des tâches d'oxydation, associées ici à une

intense activité biologique. Dessous s'étendent des limons jaunâtres, produit de la fraction de loess flotté (avec des inclusions de concrétions calcaires). Ces deux niveaux pourraient correspondre à des dépôts de débordements (du Rimbach ?) ayant entraîné des sédiments loessiques en amont.

C'est dans la couche suivante – constituée de limons rougeâtres avec des inclusions de gravillons et de nodules de ferromanganèse, des tâches d'oxydoréduction et des charbons de bois – qu'apparaissent à 70 cm de la surface les premières structures archéologiques. La partie supérieure de cette couche est datée de 2700 à 2318 BP et correspond à des phases de réactivation du cours d'eau. La partie inférieure, 7171 à 6949 BP, coïncide avec un *optimum* climatique. Le tout recouvre la formation gravo-sableuse vosgienne : des galets roulés dans une matrice sableuse.

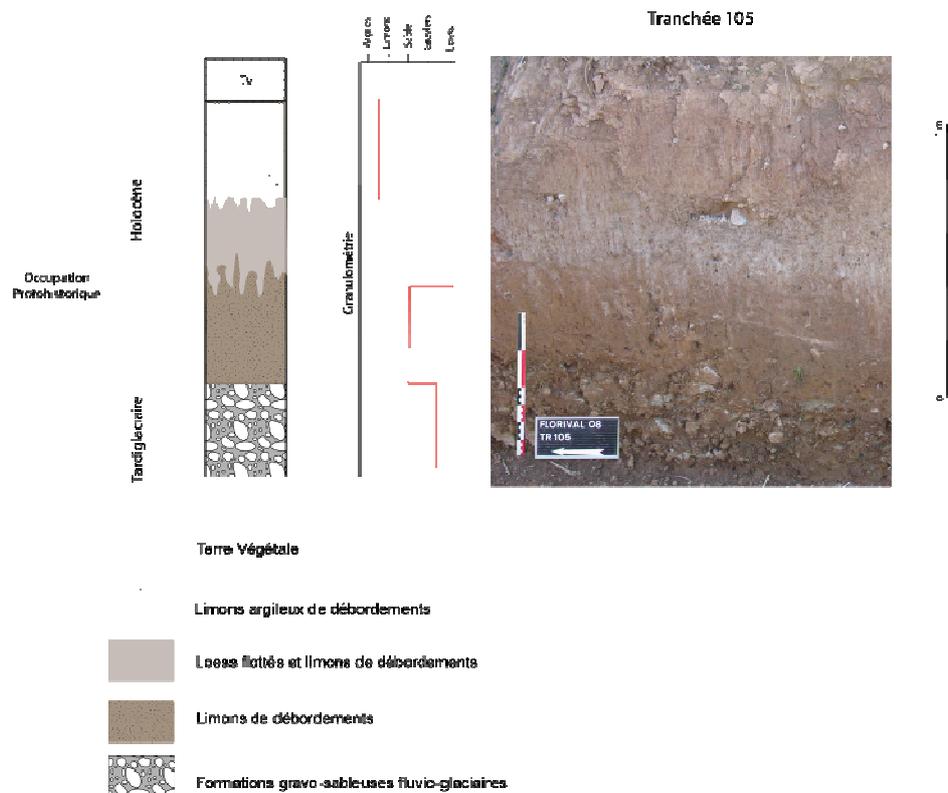


Figure 157 : Log stratigraphique des niveaux de recouvrement limoneux et loessiques (T. Vigreux)

7.2.2 Contexte et découvertes archéologiques

On dénombre sur le site 105 structures, dont 63 ont pu être datées. 7 structures sont attribuables au Hallstatt et à la Tène A, 6 sont modernes et 2 sont contemporaines. Les autres sont datées du Rubané. Dans les niveaux superficiels, un puits médiéval a été reconnu. Globalement, il y a peu de matériel céramique dans les structures, mais la fouille a mis au jour quelques lots lithiques. L'eau et l'acidité ont entraîné la disparition de toute trace de faune. Un bâtiment à trois nefs, flanqué de fosse latérales et associé à des fosses et des bois brûlés révèle une occupation Rubané. La période

protohistorique a livré un bâtiment à 6 trous de poteau et une fosse. Par manque de mobilier pertinent, les structures de la Tène ont été datées par la méthode radiocarbone. Ces dates indiquent que la fosse à galets chauffés pourrait être d'époque contemporaine alors que ce type de structure semble plutôt caractéristique de l'Âge du Bronze, révélant les erreurs liées à la méthode (prélèvement, pollution de l'échantillon, etc.). Les observations de terrains font état d'une érosion importante qui a entraîné la destruction des niveaux supérieurs des structures découvertes, dont l'état de conservation varie fortement mais qui reste assez bon. Le bâtiment néolithique, présenterait des structures plus ou moins bien conservées : fonction de la taille des structures et des ouvertures du diagnostic (Logel 2010, Peter 2008). Cette hypothèse n'est pas complètement cohérente à l'échelle du site. La variabilité d'état de conservation des structures n'est pas directement corrélée à la dynamique sédimentaire. Celle-ci semble assez homogène, aux profondeurs du niveau de décapages, et ne peut expliquer les différences entre le décapage du diagnostic et de la fouille. L'apparition de ces niveaux est donc associée à des différences de lisibilité.

7.2.3 Résultats géophysiques

Une comparaison rapide entre un log stratigraphique réalisé lors du diagnostic et le modèle inversé du sondage électrique permet de mettre en exergue leurs similitudes. Sur le log on observe un niveau intermédiaire entre le gravier et les niveaux limoneux et lœssiques que le sondage électrique n'a pas été en mesure de différencier des niveaux de limons. Une infinité de modèles peut correspondre aux mesures. Un modèle avec un minimum de couches – 3 - a été privilégié puisqu'il correspond à un modèle électrique réaliste sans être révélateur de toutes les phases sédimentaires.

7.2.3.1 Prospection hors emprise

7.2.3.1.1 Prospection magnétique

La carte magnétique hors emprise (fig. 158) n'a pas permis d'identifier d'éléments clairement attribuables à l'occupation néolithique. On reconnaît sur l'hectare prospecté un ensemble d'anomalies de l'ordre de 5 nT/m qui peuvent potentiellement correspondre à des structures archéologiques. Nous avons réalisé une déconvolution d'Euler sur ces dernières. Dans ce cas on pose l'hypothèse que la structure peut être associée à un indice structural égal à 2 (déterminé sur la base de sa géométrie). On obtient alors après ce traitement les différentes profondeurs des structures suivantes : A : 0,6 m, B : 0,8 m, C : 0,8 m et 1 m (partie de l'anomalie à l'est coupée par une tranchée), D : 0,7, 1 et 0,8 m, E : 0,8 m, F : 0,8 m. Pour les anomalies magnétiques locales de moyenne amplitude, les profondeurs estimées

sont de 0,65 cm et de 0,5 m avec un indice structural de 1,5 (la forme de la structure est proche d'une nappe de matériaux).



Figure 158 : Carte du pseudo-gradient vertical du champ magnétique terrestre superposé aux tranchées du diagnostic, visible sur les cartes de prospections magnétiques (fond C. Peter)

Certaines anomalies très fortes et ponctuelles ont été testées. On sait qu'elles correspondent à des éléments métalliques en surface, leur profondeur probablement surestimée, se situant entre 0,4 et 0,5 m. Si l'hypothèse de l'indice structural (aux alentours de 2) est correcte, alors on serait en présence d'éléments magnétiques à une profondeur correspondant à celle des structures observées lors de la fouille. Il faut aussi remarquer l'absence de l'enclos circulaire et des trous de poteaux retrouvés lors de la fouille. L'absence d'anomalies nettes entre la fouille et la fenêtre positive du diagnostic ne permet donc pas de conclure sur l'environnement archéologique du bâtiment rubané.

7.2.3.1.2 Prospection électromagnétique

Les prospections électromagnétiques ont été réalisées en dehors de l'emprise sur une surface d'environ 1 hectare et ne révèlent pas de variations majeures de résistivité électrique apparente (fig. 159). Les valeurs sont assez homogènes, 30 à 40 Ohm.m, avec des anomalies à 10 Ohm.m. Aucune organisation n'est décelable repérée sur les cartes. Il est donc difficile de s'avancer sur la nature de ces légères variations, probablement un « bruit » pédologique.

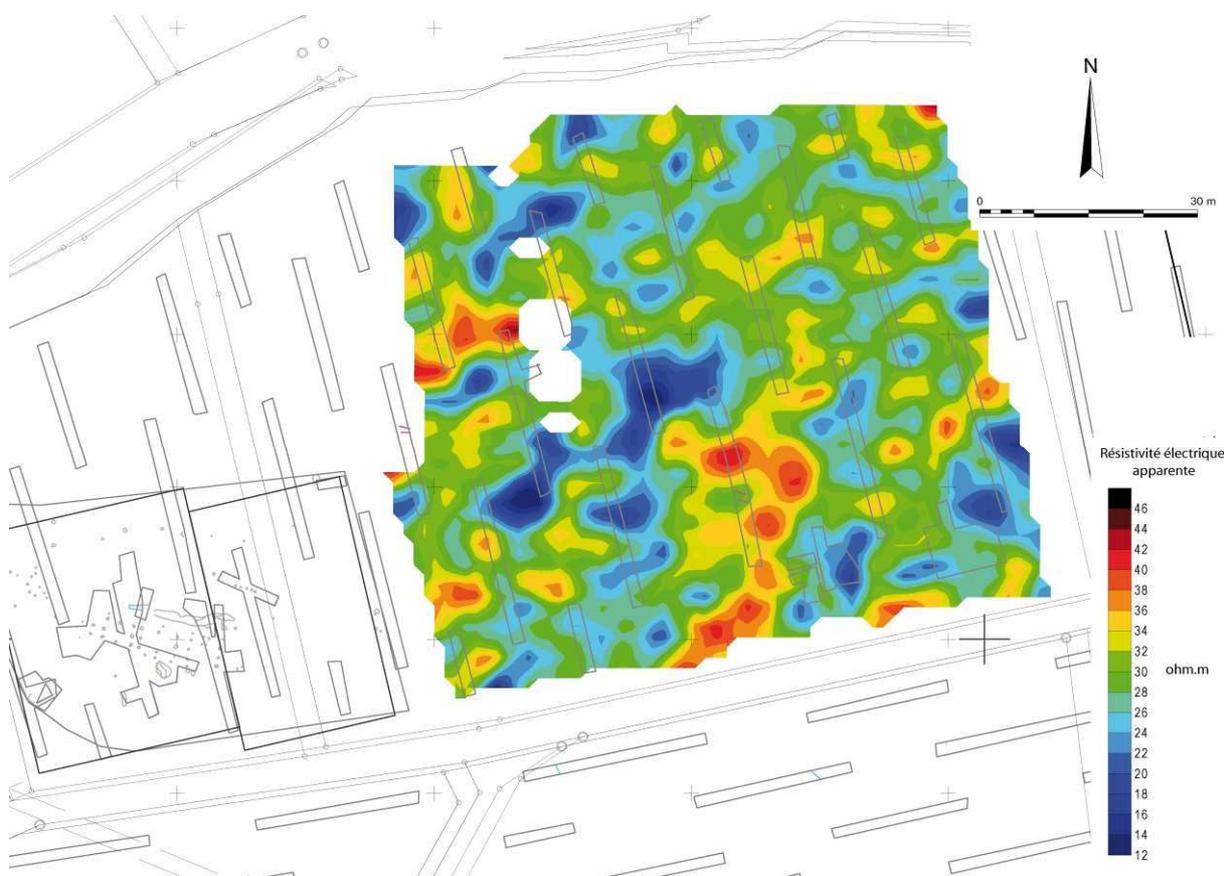


Figure 159 : Carte de résistivité électrique apparente, CS60 en mode VCP superposée aux tranchées de diagnostic (fond C. Peter)

La susceptibilité magnétique apparente sur le site est assez faible (fig. 160), de 10 à 13.10^{-5} u.S.I. Quelques anomalies magnétiques se détachent de cet ensemble homogène. Au Sud, une anomalie magnétique de 20.10^{-5} u.S.I. coïncide avec une anomalie magnétique diffuse observée sur les cartes de pseudo-gradient. De même, au Nord, une zone légèrement plus magnétique présente la même corrélation avec les cartes magnétiques. L'augmentation de l'aimantation sur ces deux zones est probablement due à une activité moderne ou contemporaine.

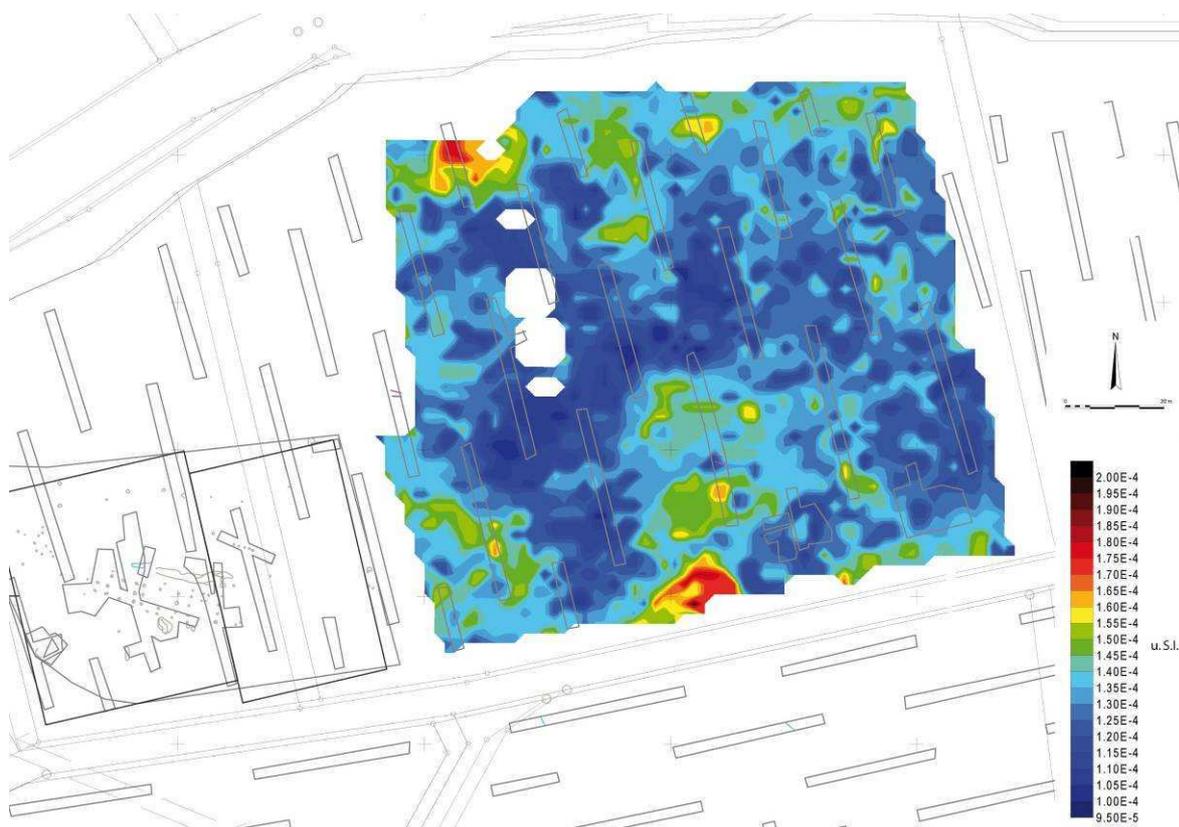


Figure 160 : Carte de susceptibilité magnétique apparente, CS60 en mode VCP superposée au plan des tranchées de diagnostic (fond C. Peter)

Trois zones avec une susceptibilité magnétique de 15.10^{-5} u.S.I. au centre, au nord et à l'ouest semblent être en relation avec des zones plus riches en anomalies du champ magnétiques. La nature de cette augmentation de susceptibilité peut potentiellement être associée à ces éléments (fig. 161). On remarque que les deux fenêtres positives qui ont permis la détection d'un enclos et de quelques trous de poteau ne sont pas associées à une anomalie de susceptibilité, peut-être à cause des perturbations et des brassages des niveaux magnétiques en surface au cours du diagnostic, perturbations auxquels le CS60 est sensible. Ces remarques sur des zones légèrement magnétiques sont fragiles car les niveaux de sols superficiels ont été brassés par les engins mécaniques lors du diagnostic. Cette observation est également valable pour les cartes du pseudo-gradient magnétique sur lesquelles on distingue très nettement les tranchées de diagnostic.



Figure 161 : Carte d'interprétation des anomalies géophysiques hors emprise (fond T. Logel)

7.2.3.2 Prospection sur surface décapée

Sur la surface décapée, une prospection du pseudo-gradient magnétique a été réalisée avec un écartement entre profils de 50 cm (fig. 162).

La première interprétation des cartes a permis de reconnaître deux creusements naturels d'origine alluviale « F1 » et « F2 » (fig. 163). Le reste des anomalies observées a été interprété comme du bruit instrumental et géologique lors de la phase terrain avant la confrontation directe des données de fouilles avec les cartes magnétiques. Ce bruit est accentué par la présence du grillage métallique en bordure sud et ouest de l'emprise.

La réalisation d'un prolongement vers le haut de 50 cm des anomalies du pseudo-gradient magnétique a mis en évidence une anomalie dans le prolongement de la fosse 33, localisée au niveau de l'amas de céramiques (st. 42) fouillé à l'extrémité ouest de celle-ci. Son orientation, parallèle à la fosse nord, suit celle du bâtiment. Elle correspond probablement à l'extension peu visible de la fosse latérale du bâtiment Rubané. Les dimensions des fosses latérales de part et d'autres du bâtiment seraient donc équivalentes.

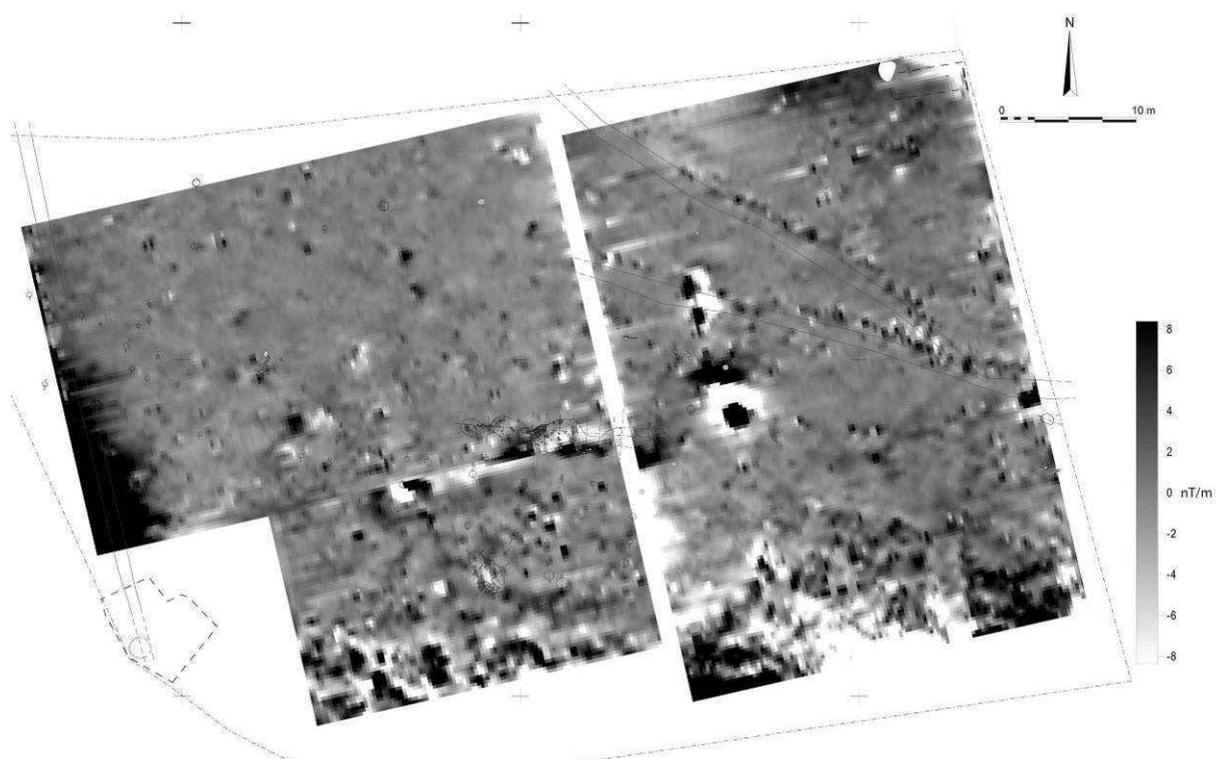


Figure 162 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre sur la surface décapée

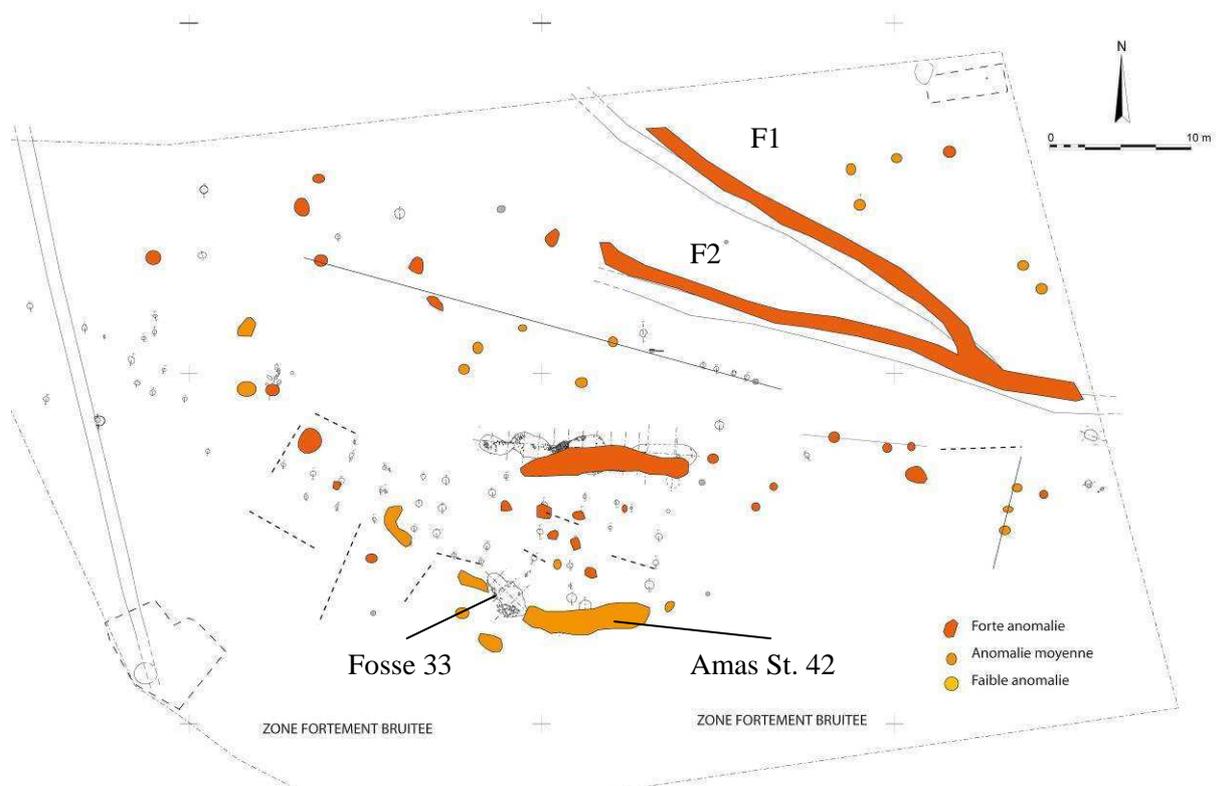


Figure 163 : Interprétation des anomalies magnétiques sur la surface décapée superposée aux observations de la fouille archéologique (fond T. Logel)

Cette observation a motivé la réinterprétation de toutes les anomalies d'abord attribuées à du bruit géologique. Sur le bâtiment, seuls certains trous de poteau ont généré des anomalies. Cela peut s'expliquer par le comblement peu profond des structures, ou par un contraste magnétique trop léger entre les structures et l'encaissant. La fouille ayant déjà été engagée lors des prospections, plusieurs structures étaient déjà à moitié vidées, ce qui peut être à l'origine de la non-détection de certaines structures de très petite dimension. Plusieurs anomalies linéaires sont probablement dues aux limites des niveaux de décapage.

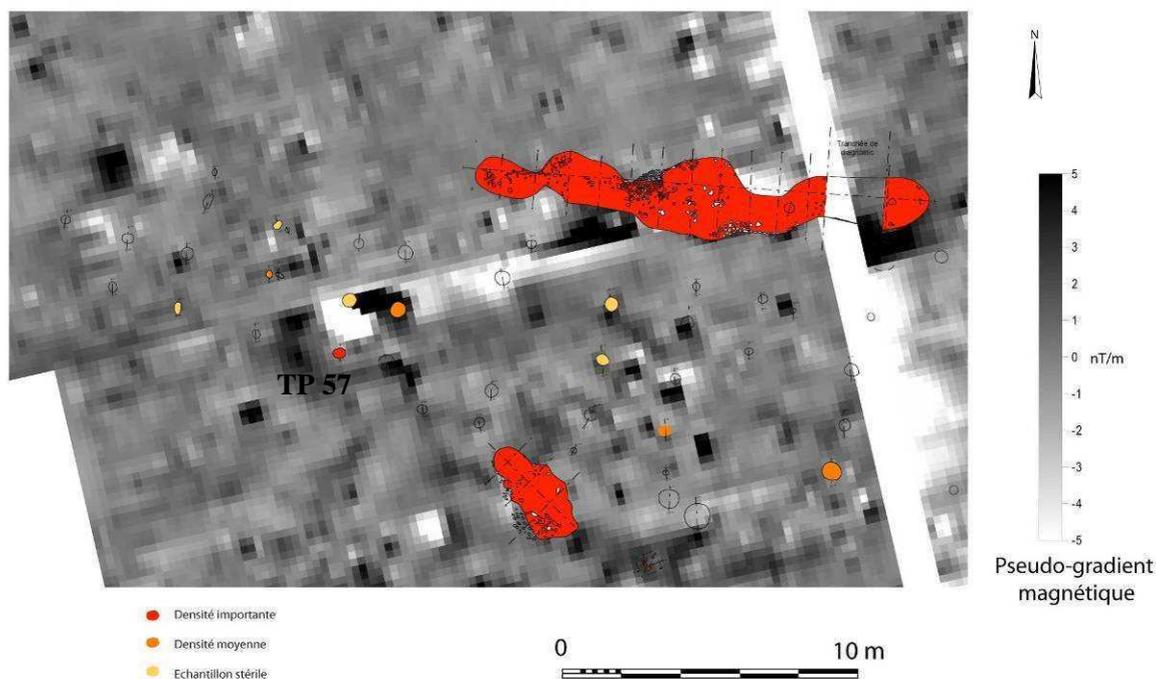


Figure 164 : Confrontation des données carpologiques et des données géophysiques. Le trou de poteau 57, le plus richement doté parmi ceux testé en tamisage semble associé à une anomalie géophysique difficilement interprétable (fond C. Schaal, T. Logel)

La fouille a permis de repérer une série de trous de poteau isolés. Sur la zone prospectée, nous avons donc essayé d'observer s'il existait une correspondance entre des éléments isolés et les anomalies ponctuelles isolées. Il semblerait que plusieurs d'entre elles soient en relation. Cela pose un problème quant à la détermination de leur origine : géologique, instrumentale ou archéologique. Dans la majeure partie des cas, l'amplitude de ces anomalies est très faible : il s'ensuit que le faible rapport signal/bruit ne permet qu'une détermination hypothétique des anomalies. Cette comparaison est d'autant plus difficile à mener que la nature archéologique des creusements n'a pas pu être vérifiée pour l'ensemble des structures. De même, plusieurs alignements d'anomalies équidistantes sont en relation avec ces éléments isolés observés au cours de la fouille.

Il existe plusieurs correspondances entre les résultats de l'analyse carpologique et les mesures d'aimantations (fig. 164). L'anomalie carpologique sur le trou de poteau 57 semble ainsi être en relation avec une anomalie magnétique. On peut supposer que ces deux anomalies ont une origine commune qu'il est difficile d'identifier. On ne peut clairement avancer que l'anomalie géophysique résulte des éléments de torchis observés dans le trou de poteau ou que le sol ait subi l'influence d'une chauffe ou d'un autre phénomène qui aurait pu favoriser la transformation du fer en oxydes magnétiques.



Figure 165 : Vue de l'amas de céramique 42 (à gauche) probablement associée à la fosse 33 (à droite) bien que sur le terrain aucun comblement n'a pu être identifié. Seule l'information géophysique donne du sens à cet amas (clichés T. Logel)

Cette étude expérimentale aurait nécessité un retour sur le terrain afin de réaliser des sondages de vérification sur certaines structures fantômes (anomalies de l'ordre de 5 nT). On aurait ici une vingtaine de structures illisibles et reconnues grâce aux méthodes géophysiques. Ce propos peut être nuancé par la présence de fortes perturbations au Sud de l'emprise qui atténuent la qualité du signal magnétique et la détermination des anomalies. On ne peut pas à ce niveau proposer un autre plan que celui établi à partir de la fouille, mais il est évident que certaines structures ont échappé à l'œil des opérateurs. Cette étude met en avant un phénomène encore peu connu et probablement assez répandu.

La prospection géophysique réalisée sur le site de Florival, même si elle n'a pas apporté l'ensemble des informations escomptées, a permis d'obtenir des informations complémentaires sur plusieurs structures associées au bâtiment néolithique et à son environnement archéologique proche (fig. 165). Le grand nombre d'anomalies sur les cartes magnétiques et la présence de structures excavées isolées laissent penser que celles-ci n'ont potentiellement pu être observées sur le site par manque de contraste visuel entre le comblement et le substrat géologique, tous deux limoneux. Elle ne remet évidemment pas en cause la qualité de l'information enregistrée mais laisse la question de l'exhaustivité des structures découvertes en suspens.

8 Synthèse des observations relative à l'étude géophysique des sites archéologiques alsaciens

L'Alsace se différencie d'autres régions voisines, notamment des grands bassins sédimentaires, sur de nombreux points : géomorphologie, caractéristiques des vestiges archéologiques et aménagement du territoire. Un grand nombre de ces spécificités n'entrent pas en compte dans le choix des méthodes géophysiques ou dans la réalisation des mesures, alors que d'autres sont déterminantes puisqu'elles vont définir le contraste entre les structures archéologiques et leur environnement et les types de perturbations, les bruits, aux quels les mesures géophysiques vont être confrontées. Nous résumons ici les différentes spécificités qui influent sur les conditions de mise en œuvre et les résultats des prospections géophysiques.

8.1 Les spécificités géomorphologiques

La principale spécificité naturelle du territoire alsacien est la variabilité des formations superficielles, causée par l'existence du graben lui-même, la proximité de plusieurs massifs cristallins et la présence de la vallée alluviale du Rhin. L'apport de sédiments y est très diversifié et leur mise en place, gouvernée par le régime hydrologique de nombreux cours d'eau, est le résultat d'une histoire complexe. On observe ainsi dans la partie sud de l'Alsace et aux débouchés des vallées vosgiennes, un recouvrement limoneux marqué par des comblements de chenaux sableux plus ou moins larges. On y trouve aussi des zones de dépôt de sédiments fins ayant entraîné la formation de poches d'argiles. Pratiquement toute la gamme des granulométries est représentée avec comme conséquence une très forte variabilité des contrastes à attendre entre les différentes structures archéologiques et le milieu environnant. Comme cette variabilité s'exprime aussi à l'échelle du site, il arrive très couramment que les contrastes soit atténués voire disparaissent d'un point à l'autre d'un même site (Weston 2001).

De façon plus générale, on n'utilisera pas les mêmes outils dans les cônes sableux du nord de l'alsace, sur les collines calcaires et en Plaine. Dans ces régions, pourtant a priori homogènes, la présence de cours d'eau transportant des sédiments sableux, érodant des niveaux lœssiques recouverts par des colluvions argileux originaires des sommets des collines où apparaissent des affleurements calcaires, nécessite une grande vigilance dans l'interprétation des cartes.

8.2 Les spécificités archéologiques

En Alsace, observe peu de structures monumentales typées (fossés, grands sites bâtis en milieu rural) aisément identifiables à la lecture des cartes géophysiques (Châtelet 2009). Les prospections aériennes des années 80 et 90 et les fouilles anciennes montrent peu de grands ensembles fossoyés à

l'image des sites de l'Ouest ou du Centre de la France. De même, nous avons rencontré très peu de sites bâties en pierre dans la plaine (Horbourg-Wihr, Houssen) qui représente la plus grande partie du territoire alsacien où on note pourtant une forte présence de témoins archéologiques divers. Les quelques *villae* reconnues le sont essentiellement dans le nord-ouest sur les plateaux lœssiques et calcaires et on en connaît très peu en plaine (Steinbourg, Duntzenheim).

La taille réduite des aménagements excavés n'est pas a priori propice à leur détection et bien des substrats ne sont pas favorables à l'existence de contrastes de résistivité électrique. Dans le cas des lœss et des sols argilo-limoneux le signal magnétique est en revanche bien développé et les propriétés magnétiques plus appropriées à la détection de structures en creux (Sainte-Croix-en-Plaine, Obernai, Roeschwoog, Bernolsheim). La méthode radar a été trop peu utilisée pour que l'on puisse aujourd'hui la prendre en compte dans notre réflexion, des tests devront être envisagés, notamment dans les cônes sableux du nord de l'Alsace pour la cartographie de structures en pierre. Les généralités sur les différents types de structures laissent donc présager de bien meilleurs résultats par l'utilisation des prospections magnétiques ou électromagnétiques, même si l'usage de la prospection électrique n'est pas à exclure (comme on a pu le voir pour la caractérisation des fossés sur le site de Dambach).

8.3 Les spécificités de l'environnement humain

Une dernière spécificité de la région est sa forte pression démographique, économique et agricole qui joue un rôle de premier plan dans le paysage de l'archéologie préventive. Ce fort aménagement renvoie une image biaisée du territoire, comme dans d'autres régions, par le fait que l'archéologie préventive se concentre, sauf pour les grands travaux du type LGV, aux marges des aménagements existants : contournements routiers ou plateformes départementales. Sur ces dernières ce sont aussi quelques servitudes et lignes à haute tension qui peuvent interférer avec le signal géophysique en détériorant sa qualité, détériorations partiellement atténuées par la sophistication des traitements. Cette pression a notamment causé de fortes pollutions métalliques, facilement reconnaissables en prospection magnétique, sur les parcelles avoisinant les aménagements actuels, et souvent associées aux pratiques agricoles d'épandage de déchets. Dans certains secteurs, ce bruit peut être très fort et nécessiter des adaptations méthodologiques. On en arrive là à un paradoxe : alors que les conditions géologiques sont favorables en Plaine à l'utilisation de la méthode magnétique, la pollution métallique exclut son utilisation tandis que la prospection électrique est moins efficace pour reconnaître la distribution spatiale de vestiges de petite dimension car le contraste électrique est faible. Enfin, la forte pression agricole entraîne une importante érosion des sols, et les labours profonds se traduisent aussi par un niveau de bruit fort notamment sur les prospections électriques ou électromagnétiques à de faibles profondeurs.

**PARTIE III : STRATEGIE DE MISE EN ŒUVRE EN
ARCHEOLOGIE PREVENTIVE :
ASPECTS METHODOLOGIQUES ET PRATIQUES**

1 Introduction

Les différentes opérations menées sur le territoire alsacien dans le cadre d'opérations d'archéologie préventive nous permettent de dresser un bilan critique de l'apport de la géophysique dans les différentes phases d'intervention et dans le cadre régional de l'Alsace. La présentation qui suit comprend quatre parties qui s'articulent autour de trois niveaux d'intervention et de type de pratiques rencontrées, suivies d'une partie ouverture et critique de l'archéologie préventive tel qu'elle est aujourd'hui pensée et pratiquée. La première partie concerne le cas des études hors emprise. Puis nous aborderons la surface décapée où l'outil géophysique peut s'avérer être un outil de reconnaissance *in-situ* à très grande échelle pour des structures non visibles. Enfin nous aborderons l'épineuse question de la géophysique en diagnostic. Une dernière partie sera consacrée non pas à l'intégration de la géophysique dans le cadre de l'archéologie préventive mais à montrer comment la géophysique, associée aux autres méthodes de prospections, pourrait permettre d'envisager une gestion du patrimoine archéologique qui s'inscrirait dans une politique d'aménagement du territoire et qui permettrait non pas de faire de l'archéologie préventive, mais de la gestion et de la conservation des sites archéologiques en optimisant les fouilles préventives toujours nécessaires au développement du savoir archéologique.

2 Hors emprise

Il a été de nombreuses fois réaffirmé que l'archéologie préventive faisait partie de l'archéologie au sens large du terme. Elle doit donc, comme l'archéologie programmée, être motivée par des problématiques scientifiques validées par les différentes instances décisionnelles et consultatives (Service Régional d'Archéologie, Commission Interrégionale de la Recherche Archéologique, etc.). Mais le compromis entre intérêts scientifiques, administratifs et politiques contrarie souvent une approche scientifique générale et dans le cadre d'une fouille préventive, l'archéologue s'en tient généralement à l'emprise du projet au-delà duquel il ne peut pas intervenir.

Dans quelques rares cas, le site, secteur où une occupation humaine d'une certaine densité est attestée, est étudié dans son intégralité (notamment sur les grands projets). Mais, le plus souvent, la surface de celui-ci dépasse largement l'emprise du projet où s'arrêtent les prérogatives de l'archéologie préventive. Il serait pourtant nécessaire dans de nombreux cas d'explorer, ce qui se fait très rarement, les environs de la fouille pour comprendre comment le site s'inscrit dans un territoire, espace naturel dans lequel l'occupation humaine prend place et interagit. Des opérations antérieures réalisées à proximité permettent quelquefois de replacer le site dans un contexte général, mais il reste le plus souvent nécessaire de trouver d'autres moyens (des outils non intrusifs) que ceux fournis par l'archéologie préventive pour étudier son environnement. La prospection géophysique, peut fournir une carte du site si les terrains avoisinants s'y prêtent, voire de l'ensemble du territoire dans lequel il s'inscrit, ce qui est un avantage non négligeable pour améliorer la compréhension de l'occupation.

2.1 Les limites d'emprise

2.1.1 Les limites d'emprise pour les projets linéaires

Les projets d'aménagements dit linéaires - projets autoroutiers, Ligne à Grande Vitesse, contournements routiers, etc. - présentent des géométries particulières. L'emprise de l'étude archéologique est alors contrainte par un transect plus ou moins étroit, qui suggère de regrouper ce type de projets dans une catégorie à part.

Sur le diagnostic, la forme du projet impose une orientation de tranchée parallèles au tracé. Cette anisotropie de l'échantillonnage peut induire un biais en facilitant ou en contrariant la lecture de certaines structures. Souvent, il est malaisé de réaliser des tranchées perpendiculaires, sans porter atteintes aux terrains mitoyens (Lombardo, 1994). Plus le projet linéaire est étroit, plus ces critiques sont justifiées. Généralement on adopte donc la méthode standard en Alsace, avec des tranchées plus ou moins longues, placées en quinconce. Pour des raisons pratiques évidentes et conciliantes, les éléments structurants du paysage actuel - haies, voies, fossés parcellaires, etc.- sont trop rarement

sondés, alors qu'ils pourraient avoir pérennisé des vestiges archéologiques (voie, passage, limites de parcelles) (Chouquer 2008). Pour les élargissements de voies ou pour les contournements routiers, des chemins peuvent ne pas être soumis à l'évaluation archéologique par commodité pour l'aménageur et les riverains ce qui réduit encore la largeur du projet sondés et accentue les biais dans la vision du site. Cette situation a été rencontrée à Ensisheim, où sur les 60 m de largeur du projet seuls 40 m ont été diagnostiqués, afin de préserver l'usage de la voirie existante.

Durant la phase du diagnostic, on peut faire appel à la prospection géophysique aussi bien sur le tracé qu'en dehors de l'emprise. L'apport est double. L'ouverture de deux ou trois tranchées ne rend pas bien compte de l'organisation des structures entre elles. La géophysique, par la vision générale du site permet de se défaire de cette contrainte. Cette reconnaissance à l'échelle de l'occupation remet en situation les structures découvertes ce qui permet de juger de leur intérêt et inscrit la section du site diagnostiqué dans un ensemble cohérent qui permet de le rattacher à une problématique pertinente.

La fouille permet en général, l'analyse exhaustive ou du moins raisonnée, des vestiges sur une emprise donnée, mais pas forcément de comprendre ou même d'identifier de façon pertinente, l'ensemble de l'occupation archéologique. Elle calibre en revanche la représentativité des résultats de la prospection géophysique hors emprise à partir de la comparaison des structures découvertes avec les anomalies géophysiques.

Les très larges aménagements linéaires - comme les LGV – sont moins exposés à ce défaut car la largeur du tracé, quoique variable dans les zones de relief, laisse beaucoup plus de liberté quant aux choix d'implantations des tranchées.

2.1.2 Ses conséquences sur les limites de fouille

Les limites de fouille concordent rarement avec les limites des sites (fig. 166). D'une part parce que projet d'aménagement et de l'emprise du site sont deux choses totalement dissociées, et d'autre part parce que le service régional d'archéologie peut être amené à prescrire tout ou partie du site en fonction de son appréciation des enjeux scientifiques. Ces limites peuvent évoluer au cours de la fouille, s'il est avéré que des structures pertinentes se poursuivent en dehors de la zone initialement prescrite. Dans de rares cas, des moyens pour d'éventuelles tranches conditionnelles ont été prévues dès le début.

La prescription de fouille se base essentiellement sur les observations du diagnostic. Par comparaison avec d'autres sites, en tenant compte de la géomorphologie, de la richesse des structures, etc., on tente d'en estimer l'extension de la surface à investiguer et son potentiel archéologique. La qualité du diagnostic est donc primordiale. Une mauvaise analyse des données du diagnostic, des lacunes dans l'enregistrement ou le traitement de données peut amener le SRA à prescrire des emprises non pertinentes.

Dans le cas de Bernolsheim, la prospection magnétique conduite en amont de l'opération de fouille a permis de signaler des incohérences entre résultats géophysiques et résultats archéologiques du diagnostic – incohérences à mettre en relation avec la mauvaise lisibilité du terrain pour cause de mauvaises conditions météorologiques -. Dans ce cadre précis, l'existence d'une clause portant sur la modification des limites d'emprise a permis de redéfinir l'emprise de la fouille et d'y intégrer deux enclos funéraires qui se sont avérés riches et bien conservés. Cette prospection avait à la base, pour objectifs, de documenter les abords de la fouille afin de repérer d'éventuelles structures qui auraient pu échapper à l'implantation aléatoire des tranchées.

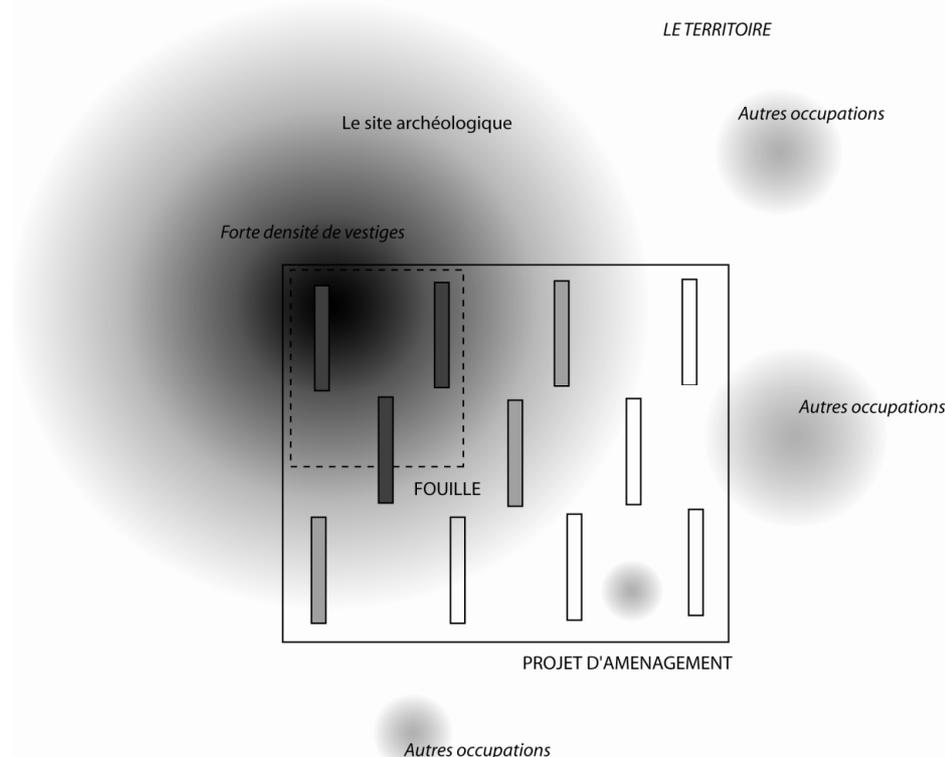


Figure 166 : Alors que le diagnostic ne révèle clairement que les secteurs denses en vestiges les abords du site sont mal appréhendés ; la fouille se concentre sur ces secteurs à l'intérieur de la surface aménagée alors que le site s'inscrit dans un territoire que la seule opération prescrite ne peut caractériser.

Une intervention géophysique, une fois la prescription établie, juste avant la fouille, pose un problème. Par définition, l'emprise du projet n'a pas à être remise en cause avant l'opération archéologique puisqu'elle a fait l'objet d'une longue procédure, depuis l'élaboration du cahier des charges jusqu'à la mise en concurrence des différents opérateurs. Pour des raisons budgétaires, un opérateur n'aurait donc aucun intérêt, voire de nombreux désavantages, à se lancer dans une révision de l'emprise d'un projet de fouille. Celui-ci impliquerait une prolongation du temps accordé à l'étude de terrain (sauf dans le cas des découvertes exceptionnelles qui est assez rarement mise en place), souvent onéreuse, et, qui plus est, en inadéquations avec les objectifs fixés du projet de fouille. Sur l'opération de Bernolsheim, c'est la durée de l'opération et la mutualisation des moyens pour traiter les 10 fenêtres prescrites qui ont permis la révision de l'emprise. A Roeschwoog, la modification de

l'emprise s'est faite au détriment de l'étude de certaines structures : des sépultures découvertes en bordure ont motivé une extension de la fenêtre décapée. Ces choix impliquent toujours une perte d'informations, bien que ceux-ci soient le plus souvent possible judicieusement fait par le SRA et par les opérateurs.

2.1.3 Les limites d'emprise des projets d'aménagements

Sur la plupart des opérations, les limites de la fouille ne sont pas le fait de l'agent prescripteur mais sont dépendantes des limites d'emprise du projet d'aménagement. Ce problème des limites est récurrent en archéologie préventive comme on l'a vu dans le cas des projets linéaires où ce sont elles qui définissent la zone d'ouverture. Néanmoins si le projet est dans une zone d'aménagement par étapes, il se peut que le site soit fouillé dans son intégralité au cours d'opérations successives. Le cadre de l'archéologie préventive ne fournit aucun moyen d'accès aux terrains non aménagés et l'archéologue doit se doter d'autres outils pour appréhender l'intégralité du site nécessaire à l'élaboration d'une problématique.

La documentation du site en dehors de son emprise relèverait logiquement de l'archéologie programmée, mais pour être scientifique l'archéologie préventive doit tendre vers une archéologie globale car archéologie préventive et non préventive relèvent du même objectif de connaissance (Ferdrière 1994). A ceci s'ajoute une difficulté administrative. Dans le cadre de l'élaboration du cahier des charges établi par le SRA et supporté financièrement par l'aménageur (sauf lorsque le projet est pris en charge par le FNAP), seul est pris en compte l'impact, en toute logique, sur les terrains menacés. L'opérateur qui établit son projet de fouille sur la base de ce cahier des charges ne prend pas en compte d'autres objectifs qui permettraient de répondre aux problématiques scientifiques. Dans ce cas, la démarche administrative, légale, s'oppose à la démarche scientifique, pourtant toutes deux explicitées dans le même texte de loi. Ce problème met en exergue la nécessité de considérer l'outil géophysique, comme tout autre types d'études spécialisées, comme un outil de l'archéologie préventive à prévoir dans les moyens consacrés à sa mise en œuvre.

Pour les terrains accessibles, une reconnaissance peut être entreprise pour délimiter le site. On peut alors faire intervenir l'ensemble des techniques de prospections, pédestre, aérienne et géophysique. Cette dernière sera sans doute la plus à même de fournir un maximum d'information, la prospection pédestre ne renseignant que sur l'extension globale, mais offre l'avantage de dater son état le plus récent, alors que l'observation aérienne nécessite des types de cultures particulières et une période d'intervention adaptée à la formation de contraste de végétation ou de couleur du sol. Ces deux méthodes ont néanmoins l'avantage de pouvoir intégrer de grands espaces avec des moyens moins important. Sauf contre-indication, l'on préférera la prospection géophysique pour repérer au moment où le site est accessible son étendue et son organisation.

L'outil géophysique doit servir à dépasser la limite purement administrative du projet d'aménagement pour replacer le site dans un contexte général. La seule caractérisation géophysique, bien qu'apportant une information spatiale voir dans quelque cas fonctionnelle, n'est pas exhaustive.

2.2 Le site dans son territoire

2.2.1 Le contexte environnemental du site

L'étude géomorphologique permet de replacer le site dans son environnement à travers l'étude des processus sédimentaires et de comprendre parfois les interactions entre l'homme et son milieu par le biais des dépôts et des phénomènes d'érosions (Burnouf 2007). L'interdisciplinarité nécessaire à cette approche et le recours à des analyses botaniques (palynologiques et carpologiques par exemple) peut préciser les caractéristiques bio-environnementales (Wattez et Jallot, 2001). La géophysique est un outil souvent employé pour appréhender les dynamiques sédimentaires. La maille de mesure plus large que pour la caractérisation des vestiges archéologiques autorise des opérations plus rapides et sur de plus grandes surfaces.

Une seule des études de ce projet a été réalisée à des fins environnementales, pour identifier plusieurs anomalies magnétiques sur le site de Sainte-Croix-en-Plaine. Une d'entre elles, linéaire, semblait délimiter un secteur présentant de nombreuses structures funéraires. Les mesures de conductivité électrique (EM31, et panneau électrique) ont révélé qu'elle correspondrait à un paléochenal de 30 m de large environ sur 2 m de profondeur et qui prendrait la même direction que la nécropole. Cette étude cartographique a ainsi mis en relation l'orientation et l'extension de la nécropole avec cet indice paléohydrographique. Les liens existant entre l'occupation archéologique et les formations sédimentaires ne peuvent être clairement définis qu'après une intervention sur le terrain afin de dater le chenal par radiocarbone ou thermoluminescence. Les deux informations géophysiques (pseudo-section de résistivité électrique et distribution de la conductivité) ne peuvent être mises en relation avec le site sans analyse de prélèvements. De même, l'environnement botanique n'est pas connu et seul un lien géomorphologique peut être proposé. Ces données pourront être pleinement intégrées aux fouilles environnantes futures qui valideront ou non les hypothèses proposées sur la base des prospections géophysiques.

Les études géophysiques conduites dans une perspective géomorphologique doivent donc être corrélées avec des analyses de terrain, carottages géologiques, ou observations lors des fouilles. Les propriétés électriques sont directement corrélées aux processus sédimentaires et cartographier la conductivité électrique revient à cartographier la distribution granulométrique (la conductivité étant directement reliée à la fraction argileuse des sols), et donc les changements de faciès, et de profondeur des processus sédimentaires majeurs.

Pour les propriétés magnétiques, la susceptibilité magnétique n'est pas directement corrélée à la nature des sols. Par contre, on a pu remarquer que les variations de détectabilité des structures sont fonction de la nature de l'encaissant.

Les paléochenaux peuvent quelques fois présenter des contrastes de propriétés magnétiques : en fonction des propriétés magnétiques qui caractérisent leur comblement et leur géométrie ils peuvent alors être détectés. Sur le site de Sainte-Croix-en-Plaine, certains apparaissent sur l'intégralité de leur tracé (en pseudo-gradient et en champ total) alors que d'autres sont totalement invisibles. Entre ces deux extrêmes plusieurs ne sont repérés que par l'anomalie générée par la limite entre encaissant amagnétique et comblement magnétique. Sur d'autres, seules certaines sections sont repérées en prospection magnétique et révèlent différentes phases de comblement. A Ensisheim les niveaux de comblement les plus récents n'apparaissent effectivement pas sur les cartes de prospections magnétiques, contrairement aux comblements plus anciens. A la surface, ces paléochenaux ne sont plus marqués dans la topographie mais ont été observés lors de l'excavation. Pour la prospection magnétique, il faut donc rester très prudent sur les interprétations géomorphologiques et tenir compte de tous les facteurs intervenants et de leurs limites (hétérogénéité du signal magnétique dans le comblement, géométrie des structures, variabilité du signal, orientation du chenal dans le champ magnétique, etc.)

2.2.2 Caractériser l'extension du site

Plusieurs prospections ont été engagées dans le but de documenter les abords d'un site archéologique, de déterminer son extension et de replacer la partie fouillée dans la totalité de son extension. Voici quelques exemples.

A Roeschwoog, les résultats positifs sur la surface décapée associés au faible recouvrement laissent présager la possibilité de cartographier l'extension du site, clairement reconnue. Les mesures de MS2 en surface auraient largement suffi à les caractériser, les niveaux de recouvrement des structures présentant en effet des valeurs de susceptibilités plus importantes que le recouvrement naturel. La prospection engagée n'a cependant pas livré autant d'informations que sur la surface décapée, où une prospection avec une maille suffisamment fine (=0.5 m) a fait ressortir des structures de petites dimensions. Dans la partie prospectée, des anomalies magnétiques très fortes correspondent, soit à des scories identiques à celles retrouvées dans plusieurs fonds de cabane, soit à des fours comme ceux fouillés plus au sud (Châtelet 2000). Les prospections réalisées avec le CS60 (40 cm de profondeur d'investigation) ont révélé de fortes anomalies, probablement des structures présentes dès les niveaux superficiels. Ces prospections hors emprise ont donc permis d'estimer l'extension du site, de reconnaître des structures remarquables, et de révéler l'existence de structures dans les niveaux superficiels du sol.

A Bernolsheim, on distingue sur les cartes géophysiques plusieurs structures funéraires circulaires ainsi qu'un ensemble de fosses même si l'interprétation en fut particulièrement délicate. En effet, de nombreuses anomalies initialement considérées comme des structures anthropiques se sont avérées être des chablis aux caractéristiques géophysiques semblables à celles des structures archéologiques. Ces chablis possèdent un comblement particulièrement magnétique, qui pourrait être dû à la présence d'une occupation humaine sur les lieux et un brassage des matériaux magnétiques par les racines et la faune. La comparaison directe des structures découvertes sur la fouille et des anomalies en périphérie n'est pas toujours facile. La diversité des structures découvertes à Bernolsheim illustre bien ce problème d'identification, même dans la périphérie de structures fouillées, récurrent pour les fosses et les structures isolées (les structures linéaires comme les fossés ou les murs sont moins difficile à identifier).

Sur le site de Bernardvillé, ces problèmes d'interprétation ont pu être écartés par les orientations des anomalies, en relation avec le plan du bâtiment actuel. L'interprétation y est néanmoins limitée par les valeurs des anomalies quelques fois trop faibles pour être clairement identifiées. Le diagnostic archéologique ne couvre qu'une très petite surface à proximité du bâtiment actuel. La prospection géophysique a permis de s'affranchir des limites de l'emprise du projet d'aménagement et de replacer les sondages dans le cadre général du site. Grâce à la prospection géophysique, le plan quasi-complet de l'abbaye cistercienne a pu être restitué, alors que le diagnostic seul ou même complété par une fouille n'aurait pu cartographier qu'une partie des vestiges, et se serait trouvé dans l'incapacité de leur attribuer une fonction.

Sur le site de Duntzenheim, la prospection électrique a mis en évidence le plan du bâtiment principal de la *villa* ainsi que des aménagements périphériques, ce qui a autorisé la comparaison typologique avec d'autres *villae* et l'identification de certains bâtiments notamment une grange dans la partie nord du site. Sur la partie du Premier Moyen-âge l'interprétation et la reconnaissance des structures excavées est moins évidente : dans la partie basse du site on ne repère que les structures les plus conséquentes alors que dans la partie haute, on reconnaît beaucoup plus aisément le fond de cabane avec un comblement magnétique marqué. On remarque sur ce site une forte variabilité de signature géophysique due aux types de structures (murs, fosses, structures de chauffe, etc.) et à l'encaissant géologique. De façon générale, la prospection a largement contribué à l'identification de la forme générale de la *villa* (fig. 167). La cartographie de structures périphériques sur le secteur du Premier Moyen-âge a précisé l'extension du site et de son secteur à vocation artisanale.

A Soultz, les résultats ont apporté peu d'informations en raison de la profondeur des structures et des perturbations causées par le diagnostic. Beaucoup de doutes persistent sur la nature des anomalies : certaines pourraient correspondre à des structures non reconnues lors du diagnostic. La présence de fantômes magnétiques sur la fouille, invite à ne pas rejeter cette hypothèse. Les limites de l'interprétation des données empêchent ici d'intégrer les résultats des prospections à l'étude

archéologique. Les informations ne sont pas suffisantes pour affirmer qu'il s'agit bien là d'un bâtiment isolé.

La cartographie de l'extension des sites permet de réaliser des comparaisons typologiques avec d'autres établissements contemporains, voire de révéler des incohérences sur la caractérisation des vestiges sur la fouille et l'existence potentielle de certaines structures et de certains niveaux.



Figure 167 : Photographie aérienne de la villa de Duntzenheim avec superposition approximative du tracé LGV (Schneikert 2007)

2.2.3 Une approche spatiale territoriale et intersite

Si on change l'échelle, on peut mener une réflexion pour tenter de déterminer les interactions entre les sites proches, et, sur une plus vaste étendue encore, envisager la place du site dans son territoire. Il faut alors caractériser avec finesse le contexte géologique dont est tributaire l'efficacité de l'outil géophysique. Cette reconnaissance du contexte géomorphologique peut dans certains cas guider la compréhension et la définition de l'occupation de l'espace.

La combinaison d'une reconnaissance à grande échelle et de la fouille de secteurs plus isolés peut définir des modèles spatiaux très précis. Une telle étude a été mise en œuvre sur la commune de Sainte-Croix-en-Plaine qui faisait en 2008 l'objet d'une étude de territoire. Les premières prospections ont été réalisées à l'emplacement d'un ancien diagnostic pour vérifier la pertinence de l'outil. Une fois celui-ci validé, elles ont été menées en dehors des emprises des anciens projets d'aménagement aujourd'hui temporairement abandonnés. On a pu reconnaître l'extension des deux nécropoles mais aussi compléter les informations des opérations archéologiques pour localiser les structures isolées,

qui semblent faire le lien entre les ensembles plus riches en structures funéraires. Les données géophysiques ont apporté des informations sur l'agencement spatial de ces vestiges, déjà pressenties lors des résultats des diagnostics. Dans le cas de Sainte-Croix-en-Plaine, l'analyse des données LiDAR, des photographies aériennes et des images satellitaires conduit à repousser aujourd'hui les limites spatiales de la zone étudiée, en périphérie de l'actuel village où les anciens aménagements (d'avant 1980) n'avaient pas fait l'objet de procédures archéologiques. La reconnaissance de l'ensemble des parcelles nécessiterait un projet à long terme basé sur l'analyse géophysique et la mise en relation de données de photographies aériennes et LiDAR. Ces études combinées sur le site de Sainte-Croix-en-Plaine serviraient de base à la définition de secteurs à très fort potentiel archéologique (sans exclure l'existence de vestiges en dehors de ces zones). Ces nouvelles découvertes alors intégrées à l'étude préexistante permettraient de réviser ou d'affiner le modèle d'occupation de ce territoire.

Il en va de même sur d'autres secteurs, où de nombreux sites ont été repérés, mais qui ne font pas encore l'objet d'étude. En partie à cause du manque de connexions entre les différentes zones (sites mineurs non fouillés, etc.).

Ces études sur de vastes surfaces font intervenir un ensemble de moyens d'investigation parmi lesquels la géophysique se montre actuellement une des plus efficaces sur le territoire alsacien quand la prospection aérienne est limitée par la monoculture du maïs et le LiDAR par la pression et l'érosion agricole. Les cartes anciennes doivent être intégrées à cette démarche afin de bien replacer l'aléa hydrologique, fort dans la région, les anciens parcellaires et les sites modernes abandonnés.

3 La reconnaissance des fantômes géophysiques : des mesures sur surface décapée à l'étude de la stratigraphie

3.1 Les structures fantômes

L'efficacité de la géophysique est souvent évaluée par comparaison entre les structures mises au jour dans les sondages archéologiques et les résultats des mesures géophysiques. Ces comparaisons ont comme objectif de certifier que la géophysique est bien en mesure de reconnaître les structures archéologiques observées sur le terrain. Elles ne sont néanmoins pas toujours pertinentes : les structures archéologiques peuvent être invisibles tout comme elles peuvent être non identifiables en géophysique. A de nombreuses reprises, celle-ci a d'ailleurs fourni, sinon plus d'informations, du moins une information complémentaire aux observations visuelles.

Une structure archéologique ne génère pas systématiquement une anomalie géophysique. Par contre, une anomalie géophysique a toujours une origine physique, archéologique ou naturelle. On ne peut nier que l'anomalie est causée par une structure même si lors de la fouille, elle n'est pas associée à un contraste visuel. Sa reconnaissance géophysique ne résout cependant pas le problème de son identification. Quand la signature de l'anomalie est proche de celle d'une anomalie habituellement associée à une structure, on peut émettre l'hypothèse qu'il s'agit d'un vestige archéologique. Quand l'anomalie est isolée ou présente une signature différente de celles habituellement rencontrées, son identification est plus complexe.

Les structures « fantômes » ont été définies comme des structures archéologiques qui possèdent des contrastes de propriétés physiques avec l'encaissant et aucun contraste visuel (couleur et/ou texture) qui permettrait de les distinguer sur le terrain. On peut cependant les repérer en réalisant des mesures géophysiques. Comme le taux d'humidité, la luminosité et les conditions météorologiques peuvent faire fortement varier la visibilité d'une structure, la limite entre fantômes et structures fugaces (i.e. peu contrastées) est très ténue. Nous considérerons qu'une structure est dite fantôme si elle n'a pas pu être repérée visuellement sans utiliser l'information géophysique. A plusieurs reprises, ces fantômes ont pu être reconnus sur la fouille à partir des cartes, en étant particulièrement vigilant sur le secteur étudié ou en réalisant un second décapage. Il s'agit essentiellement de structures en creux (fosses, fossés, trous de poteau) et de niveaux archéologiques.

3.1.1 La nature des fantômes magnétiques

Les fantômes magnétiques peuvent adopter des formes très variées (fig. 168). Il s'agit de structures qui échappent à la perception visuelle car les contrastes sédimentaires ou matériels sont trop faibles à l'échelle à laquelle ils sont étudiés. Généralement, une structure est considérée comme telle à

partir du moment où son comblement se différencie du substrat. Les premiers indices d'apparition sont donc rarement pris en compte lors des décapages, que l'on poursuit jusqu'à l'obtention d'un net contraste, ou la disparition pure et simple de la structure potentielle.

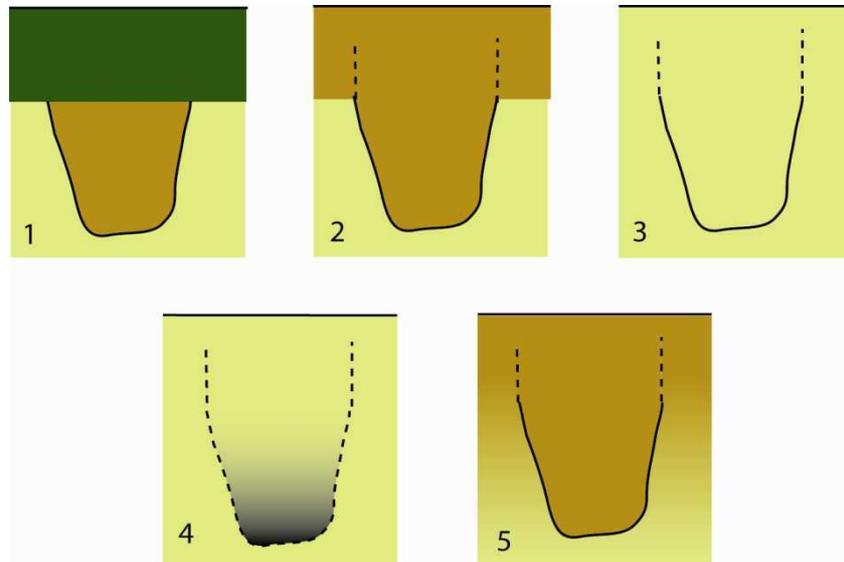


Figure 168 : Différents aspects des structures. La structure 1 a été érodée puis recouverte par un niveau de sol dans lequel s'est développée la terre végétale. La structure 2 est en partie creusée dans le substrat mais sa partie supérieure est en place dans un niveau qui ne la différencie pas. La structure 3 est totalement invisible. La structure 4 est comblée par des éléments archéologiques qui lui confèrent une couleur particulière. Enfin la structure 5 se détache du substrat avec des contrastes nets qui s'accroissent en profondeur.

Sur la base des prospections et des observations archéologiques, il est possible de dresser la liste des différents aspects que peuvent revêtir les fantômes : soit la structure est complètement invisible, soit elle ne l'est que partiellement selon trois modalités.

Première situation : En plan, seule une partie de la structure est visible. Ce phénomène est en général associé aux structures archéologiques qui ont été comblées en plusieurs séquences.

Deuxième situation : Quelquefois, seul le fond de la structure est visible. Cette situation est régulièrement rencontrée surtout dans certains contextes géologiques (limoneux, lœssiques) qui présentent des niveaux de recouvrement assez importants. On a toujours interprété la partie visible de la structure comme le fait de l'état de conservation, les niveaux supérieurs invisibles étant alors considérés comme érodés. Même s'il arrive que l'érosion entraîne une mauvaise conservation, il semblerait que les structures de faible extension verticale puissent correspondre à des problèmes de visibilité de la partie supérieure du comblement. Il arrive ainsi que les problèmes de lecture des structures soit prédominants. Quand l'érosion et les fantômes sont associés il est difficile de quantifier l'impact de chaque processus sur les structures si les phases d'érosions ne sont pas par ailleurs identifiables.

Troisième situation : Les structures apparaissent graduellement au cours de la fouille. Les contrastes dans la partie supérieure du comblement ne sont pas assez importants pour rendre visible la

structure et permettre de juger de la nécessité de l'étudier. Cette apparition graduelle peut être corrélée à la présence de matériaux archéologiques (Soultz, Obernai, Roeschwoog). A plusieurs reprises, nous avons pu observer que l'apparition graduelle des vestiges pouvait être causée par un premier comblement de la structure, avec des niveaux fortement altérés et perturbés lors de l'occupation du site, alors que le comblement terminal se faisait avec des niveaux de terre plus homogènes et proches du substrat. Le phénomène d'apparition graduelle des structures a été couramment observé, mais reste difficile à traiter manuellement pendant la fouille car il implique plusieurs niveaux de décapages ainsi que la mise en œuvre de moyens complémentaires pour l'étude (analyses pédologiques, etc.).

L'observation de structures partiellement visibles est courante sur les terrains sans investigations géophysiques (apparition graduelle, etc.). De même, il arrive d'observer sur la fouille des concentrations de matériaux qui peuvent être en lien avec une structure archéologique peu visible (comme des blocs servant de calages de poteaux). Ces objets qui ne semblent pas associés à un creusement sont souvent l'expression visuelle d'une structure dont le comblement n'est pas perceptible. Les observations réalisées à ce propos sur plusieurs opérations prouvent la récurrence de problèmes de lecture (Duntzenheim, Horbourg-Wihr).

3.1.2 Les origines des contrastes géophysiques

Le comblement d'une structure est toujours différent de l'encaissant même s'il ne se caractérise pas par un contraste physique ou visuel et qu'il est difficile de l'identifier et d'attribuer une fonction à la structure.

Le contraste géophysique entre le comblement de la structure et son encaissant peut avoir différentes origines : pour les structures fantômes en place sous la couche cultivée, le comblement est généralement naturel (colluvions) puisque la présence de matériel archéologique, d'éléments allochtones ou de pierres rubéfiées favorise la reconnaissance du comblement d'origine artificielle, sauf quand celui-ci est situé au fond de la structure, en dessous du niveau d'observation du décapage. Le signal magnétique dû au comblement peut avoir différentes origines et est dépendant des caractéristiques du terrain encaissant. Sur les terrains lœssiques, le drainage naturel favorise la formation d'un signal magnétique, alors que sur les sols argileux, la présence d'hydromorphie favorise la dissolution des oxydes magnétiques (Banerjee, 1993). Lorsqu'il y a pédogenèse sur le comblement de la structure, sa reconnaissance visuelle est généralement plus aisée dans la mesure où le sol développé sur la structure va dépendre (même légèrement) des caractéristiques de celle-ci. Cette pédogenèse entraîne également des modifications des tailles de grains magnétiques et de leur nature (oxydation, activité biologique, cas de la fermentation associée à la formation de magnétite) pouvant entraîner une différence de propriétés magnétiques (Marmet et al. 1999). Elle est toujours fortement

influencée par la nature du sédiment, et la matière organique souvent associée au matériel archéologique présent dans la structure (Hulin *et al.* à paraître).

Les structures fantômes sont rarement des structures de chauffe car celles-ci modifient clairement la texture et la couleur des sédiments, sauf dans quelques rares cas (Hulin à paraître). Quelquefois la présence d'objet et de matériel au fond de la structure (lithique, terre cuite) peut se traduire par une anomalie géophysique en surface, alors qu'aucune différence visuelle entre le comblement et l'encaissant géologique n'est observable et que, le décapage n'a pas encore directement atteint les artefacts archéologiques (Roeschwoog).

Les structures fantômes « électriques » sont caractérisées par des différences d'homogénéité, de teneur en argile ou d'humidité, dues aux remaniements de terre et/ou de sédiments (perturbations anthropiques du sol, brassages de sédiments). Ce phénomène n'a pas été observé sur nos sites mais il existe quelques études qui en font état (Simon 2008).

3.1.3 Etude des fantômes géophysiques

Les études micromorphologique ou sédimentologique, demandent une reconnaissance préalable du terrain et un choix de l'emplacement d'observation et de prélèvement. Seules des méthodes de cartographies de propriétés physiques permettent d'aborder l'étude des fantômes. On dispose de nombreux outils géophysiques pour réaliser les mesures. Dans le cadre de notre étude, nous avons essentiellement utilisé des outils de prospection magnétique et électromagnétique, car les mesures électriques auraient nécessité de nombreuses implantations d'électrodes sur la surface décapée.

Les mesures magnétiques sont les plus pertinentes car c'est la résultante des différentes aimantations magnétiques (induite, rémanente et visqueuse) qui crée l'anomalie. Un faible contraste de susceptibilité de 5 ou $10 \cdot 10^{-5}$ u.S.I. peut générer une anomalie du champ magnétique assez importante si à l'aimantation induite s'ajoute une aimantation visqueuse et/ou thermorémanente.

Pour les mesures de la seule susceptibilité magnétique, le contraste doit être assez important, tout comme le rapport signal/bruit des mesures. Celles-ci doivent se faire avec un maillage très fin, ce qui implique des temps d'acquisition très longs avec des appareils de mesure encore mal adaptés à l'acquisition en continu (MS2, CS60). Nous nous sommes limités à de petites surfaces pour la reconnaissance de structures et à des mailles de mesure plus lâches employées pour cartographier des structures de très grandes dimensions et des niveaux archéologiques. Les sépultures, sur le site de Bernolsheim, possèdent de forts contrastes de susceptibilité magnétique qui ont rendu possible la délimitation des fosses de creusement, comme ce fut le cas pour celles cartographiées à Roeschwoog. Ces sites sont tous deux installés sur un substrat limoneux. A Roeschwoog, le comblement des structures d'habitat creusées dans un substrat gravelo-limoneux, présentait des contrastes de

susceptibilité magnétique moins forte que sur la nécropole, malgré la présence de nombreux éléments céramiques au fond des structures.

Pour les mesures de la résistivité électrique le décapage provoque souvent un assèchement du sol en surface alors que si celui-ci est humide, il est souvent peu praticable sans risque pour les niveaux et structures archéologiques, ce qui rend difficile la réalisation des mesures électriques sur surface décapée. De plus, la présence de bermes entraîne d'importantes distorsions sur les mesures : les géométries de diffusion du courant sont modifiées par la microtopographie.

Lors de l'ouverture par sondage mécanique il n'est pas toujours possible d'atteindre le fond souvent plus visible des structures, s'il existe autour d'elles, des structures déjà visibles dans des niveaux supérieurs. Le décapage se limite en effet à ces premiers niveaux qui ne laissent des fois pas en présager d'autres. Ce cas peut être illustré par la fouille de Roeschwoog. Sur la surface décapée aucune différence visuelle n'est apparue entre les comblements gravelo-limoneux sombres et le substrat gravelo-limoneux. Si la présence de matériel en terre cuite n'avait pas généré de fortes anomalies que l'on a pu aisément distinguer du bruit ambiant, les contrastes de propriétés magnétiques du seul comblement, de l'ordre de $10 \cdot 10^{-5}$ u.S.I., auraient entraîné un très faible signal magnétique en prospection qui aurait été caché par le bruit ambiant.

3.2 Les niveaux de sol et stratigraphique fantômes

La nature archéologique d'un niveau stratigraphique est définie à partir du matériel archéologique ou de formes sédimentaires remarquables à l'échelle macroscopique sur le terrain. Comme pour les structures, il existe différents moyens - dont la géophysique - pour appréhender ces niveaux. Certaines techniques sont déjà utilisées en complément de l'approche visuelle sur les niveaux stratifiés, afin de déterminer les limites et la nature des couches, comme la géomorphologie, la micromorphologie, la palynologie, etc. Certains niveaux archéologiques semblent également invisibles. De fait, le décapage préliminaire à la fouille peut entraîner une perte d'informations : le retrait de couches superficielles impliquant le retrait des niveaux archéologiques invisibles qu'elles comportent. Ces difficultés de lecture sont exacerbées dans le cas des terres noires où le comblement des structures, tout comme la différenciation des niveaux stratigraphiques, est malaisée.

3.2.1 Caractéristiques physiques des niveaux archéologiques

Les différences de propriétés physiques entre les niveaux archéologiques et les niveaux naturels sont similaires aux différences observées entre le comblement des structures et l'encaissant. Elles peuvent être dues à différents matériaux (à l'échelle macro ou microscopique), ou pour les

propriétés magnétiques à des différences de tailles et de nature des oxydes de fer liés à des conditions favorisant le développement de minéraux plus magnétiques.

Un des problèmes majeurs pour la reconnaissance des niveaux est que la variabilité du signal géophysique, sur un profil stratigraphique, peut être induit par des processus naturels aussi bien qu'archéologiques. Il faut donc pouvoir déterminer la part des facteurs naturels, des processus de sédimentation, et anthropiques dans l'évolution du signal. D'une façon générale, sur les sols peu perturbés, la susceptibilité magnétique décroît avec la profondeur (Le Borgne 1955). Cette décroissance est dépendante de la nature de la roche mère sur laquelle se développe le sol tout comme des phénomènes de comblements, associés à des phases d'érosions. Ces variations rendent l'analyse de la susceptibilité magnétique plus complexe et nécessitent de réaliser des mesures en stratigraphie.

A profondeur égale et dans un contexte homogène, les différences de susceptibilité magnétique peuvent être la conséquence des différentes activités pratiquées sur le site (métallurgie, forge, atelier de potier, etc., parcage). La reconnaissance de ces contrastes représente un important potentiel pour l'interprétation de l'organisation spatiale. Les mesures de susceptibilité magnétique sont néanmoins à envisager dès le début du décapage et appellent la confrontation des résultats géophysique et des structures découvertes, pour préciser les analyses à réaliser.

Les différences de propriétés magnétiques observées entre les niveaux de sols ou d'occupation archéologiques et les niveaux naturels sont plus importantes que celles des propriétés électriques alors que la composition sédimentaire est souvent très proche pour différents niveaux archéologiques non visibles. Si la composition sédimentaire diffère un contraste visuel a de bonne chance d'exister.

3.2.2 Etude géophysique des niveaux archéologiques

Tandis qu'en planimétrie des mesures permettent de distinguer l'organisation et la distribution spatiale des vestiges et des niveaux qui y sont associés, il existe différents moyens spécifiques d'appréhender sur la verticale la distribution des niveaux archéologiques. Les prospections électriques multi-profondeurs (en général 3 pour les dispositifs de mesure en continu comme l'ARP ou pour les dispositifs manuels comme le RM15) en donne une première idée mais il est toujours important de préciser la stratigraphie d'un site. Pour ceci, avant (ou après) décapage on peut réaliser un sondage ou une diagraphie géophysiques.

3.2.2.1 Le sondage électrique

Le sondage électrique permet de reconnaître l'évolution verticale de la résistivité électrique en un point donné du terrain, il est particulièrement bien adapté à la reconnaissance des formations superficielles sur (ou dans) lesquelles s'est installé le site. Il est en revanche peu adapté à la

reconnaissance de la stratigraphie fine pour laquelle le radar sol peut être mise en œuvre dans les milieux pauvres en argile. L'exécution de mesures de diagraphie dans de petits forages telle qu'elle commence à être pratiquée pour la susceptibilité magnétique en contexte archéologique (Dalan 2006) est une voie prometteuse.

3.2.2.2 La diagraphie

La diagraphie consiste en l'enregistrement continu d'un paramètre en descendant une sonde dans un petit forage (de diamètre proche de 2 cm), on n'est plus strictement dans une méthode non-invasive, mais le diamètre du forage est suffisamment faible pour que la perturbation des témoins archéologique soit sans conséquence sur l'interprétation. Une diagraphie permet une analyse fine, qui ne nécessite pas d'approximation dues à l'inversion des données comme c'est le cas pour les mesures à partir de la surface. Pour les mesures des propriétés magnétiques des niveaux stratigraphiques, la mesure en diagraphie rend possible l'identification de couches à l'échelle centimétrique en décrivant l'évolution du signal magnétique avec la profondeur. Si la mesure de la susceptibilité magnétique est une mesure absolue son interprétation en terme archéologique dépend du contexte géologique du site et ne peut être basée que sur les variations relatives. Les niveaux d'occupation (a fortiori de travaux artisanaux) correspondent à des maxima. Dans quelques cas particuliers, l'apport de matériaux exogènes en assez grande proportion (matériaux de construction, chaux) entraînerait une diminution de la susceptibilité magnétique. Sur le site d'Ensisheim, nous avons pu rendre compte de variations en lien avec la profondeur des sédiments, mais aussi de pics de susceptibilité corrélés avec des niveaux d'apparitions de structures.

3.2.2.3 La reconnaissance par mesure de susceptibilité magnétique

Au sol ou sur surface décapée il est possible d'utiliser des appareils électromagnétiques pour cartographier les niveaux et identifier les zones présentant des valeurs de susceptibilité magnétique relativement élevées. Ils ont l'avantage d'être sensibles à cette propriété et non aux seuls contrastes latéraux d'aimantation comme l'est la méthode magnétique. Cependant, si des valeurs élevées de susceptibilité peuvent être a priori corrélées à une forme d'anthropisation, l'interprétation de variations plus ténues doit tenir compte des paramètres environnementaux du milieu (Marmet 2000).

Pour la cartographie des niveaux archéologiques, il serait optimal de coupler la cartographie de la distribution spatiale obtenue grâce aux appareils de prospection EM (ou de prospection magnétique) avec les mesures en diagraphie pour rendre ainsi compte de la distribution spatiale en 3 dimensions de la susceptibilité magnétiques (Dalan 2006). Sur le site de Duntzenheim, la richesse des niveaux archéologique en matériel microscopique a accentué les différences de

susceptibilité magnétique mesurée avec le susceptibilimètre. La carte du champ magnétique ne révèle pas ces nappes de matériaux, car leur géométrie est trop lenticulaire pour être visible. C'est ici la richesse et la pollution du site (chauffe des matériaux, battitures éventuelles, débris de céramiques) qui permet de distinguer différents secteurs probablement en lien avec une structuration de l'habitat.

3.2.2.4 La reconnaissance en prospection magnétique

Quelquefois, le contraste d'aimantation et les écarts de position verticale entre deux couches sont assez importants pour entraîner une anomalie significative sur les cartes du champ magnétique (ou de son gradient). Une telle rupture latérale est associée à une anomalie magnétique linéaire marquant le contact.

Dans le cas de Horbourg-Wihr, les anomalies linéaires seraient associées à des différences de niveaux archéologiques (fig. 169). Il faudrait confirmer ces interprétations par des analyses de sédiments, lors de la fouille, qui serviraient probablement à proposer une interprétation assez fine de la nature de ces ensembles et des perturbations du niveau de sol. Sur ce site les anomalies sont associées à des blocs éparpillés appartenant à des supports de murs en matériaux légers. L'intérêt de ces mesures, fortement contraintes par l'existence d'une rupture verticale nette qui n'est pas systématique vient de ce que l'anomalie du champ total additionne les effets des aimantations induites et visqueuses des matériaux. L'aimantation thermorémanente n'est significative que lorsque les éléments n'ont pas été déplacés depuis la dernière chauffe.

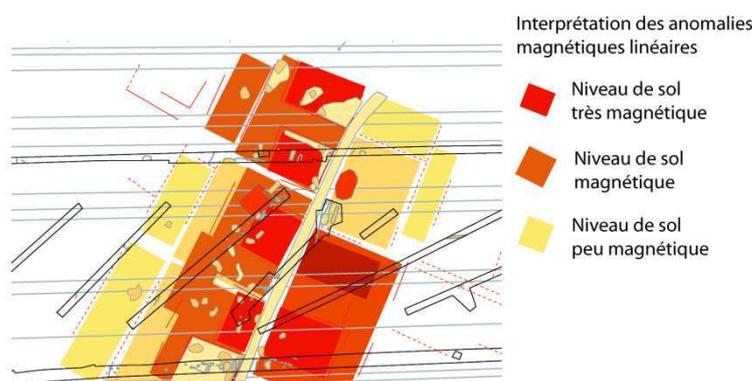


Figure 169 : Délimitation à partir des données de prospections magnétiques de secteurs présentant des propriétés magnétiques différenciables associées à des activités ou des aires dédiées (habitat, etc.) (cliché S. Chauvin)

Lorsque l'anomalie d'aimantation n'est pas très forte, soit parce que le contraste est trop faible, soit à cause de la géométrie du niveau archéologique, on peut appliquer une transformation des données qui restitue les variations d'aimantation verticale d'une couche fine équivalente (Desvignes *et al.* 1999), cette aimantation peut ensuite être transformée en susceptibilité équivalente d'une couche

d'épaisseur donnée. Ce calcul met en évidence des espaces plus magnétiques. Sans cette transformation la méthode magnétique ne montre que les bordures de ces espaces. Ce traitement a été utilisé (Hulin *et al.* à paraître) pour l'étude d'un bâtiment néolithique prospecté par la méthode magnétique.

3.3 Les études sur surface décapée

L'accès direct, sans couche superficielle, à la structure fantôme qui présente souvent peu de contraste décuple la sensibilité des appareils.

L'absence de la couche superficielle qui entraîne une atténuation du signal, et un bruit important causé par les éléments métalliques inévitables dans la couche la plus superficielle, rend les mesures sur surface décapée très intéressantes (Von der Osten-Woldenburg, 2002) et plus faciles à interpréter. Pour la méthode magnétique en effet, l'éloignement du capteur provoque une atténuation du signal (celui-ci décroît $1/r^3$ avec r la distance entre le capteur et la structure).

La caractérisation des niveaux archéologiques sur surface décapée est plus sûre si une première détection a pu être réalisée en amont du décapage. La fouille mécanique du site nécessite toujours de retirer les niveaux de terre végétale pour faire apparaître les structures. Dans les niveaux les plus superficiels, l'activité biologique et la pédogenèse des sols forment des niveaux où il peut être très difficile de distinguer des structures car celles-ci présentent de faibles contrastes de couleurs et peu de matériel ou d'éléments archéologiques caractéristiques. Dans le cas de Roeschwoog, les différences observées entre les structures cartographiées sur la surface décapée et les anomalies à la surface du sol sur la parcelle mitoyenne conduisent à envisager la présence d'éléments archéologiques structurés dans le niveau décapé. Les mesures EM Slingram voisines ont mis en évidence l'existence de contrastes assez élevés de susceptibilité magnétique et de conductivité dans ces niveaux superficiels. Ces anomalies de susceptibilités magnétiques et les nombreux éléments de céramique ont montré l'existence des niveaux archéologiques non reconnus lors du décapage.

L'information géophysique doit partout où c'est possible être prise en compte avant le décapage pour la mettre en relation ensuite avec les observations de la fouille (Von der Osten-Waldenburg 2007). Ses impératifs ne permettent pas d'envisager systématiquement cette solution qui pose certains problèmes techniques et financiers qui en découlent quant à l'identification de ces structures non différenciées. Des tests avec de nouveaux outils comme les géoradars ou les appareils électromagnétiques à moyennes fréquences apporteront de nouvelles informations par les mesures des taux d'humidité variable en fonction des différents comblements (texture, macropores, matériel (céramique, etc.).

3.4 L'assimilation de l'information géophysique

3.4.1 Considérations pratiques

3.4.1.1 Quand intervenir ?

En pratique, les mesures sur surface décapée impliquent une collaboration très étroite entre le géophysicien et le fouilleur. L'intervention doit se faire le plus en amont possible de l'étude des structures, qui engendre des perturbations diverses du terrain (fouille des structures). Sur la fouille, ces mesures peuvent demander des sacrifices quelquefois trop importants pour en justifier la mise en œuvre.

3.4.1.2 Le problème des bermes

La recherche de contrastes visuels forts entre les structures encourage souvent les archéologues à réaliser des décapages qui ne sont pas uniformes à l'échelle du site. Les pratiques ne sont pas toujours cohérentes avec les caractéristiques du terrain car inspirées par la nécessité de retrouver des comblements différenciés. Les différences de niveaux de décapages impliquent deux problèmes majeurs qui peuvent se répercuter sur les données géophysiques :

Les bermes génèrent des anomalies sur les prospections magnétiques et des difficultés dans l'acquisition des mesures (toujours rapide au cours de la fouille). La modification de la distance entre les capteurs et le sol entraînent des anomalies. Il serait envisageable de réduire l'influence voir d'éliminer ces anomalies mais il faudrait connaître la distribution de l'aimantation dans le sol et la géométrie précise des bermes. Les bermes résultent de différences de niveaux de décapage qui peuvent présenter des valeurs géophysiques variables. Les mesures géophysiques rendent compte de ces différences, induites par le surcreusement lors du décapage de certaines zones. Il est donc préférable d'intervenir avant la réalisation de bermes souvent nécessaire à la reconnaissance et l'étude des structures.

3.4.1.3 Les clous !

Une autre considération purement pratique et pourtant très importante concerne l'usage de clous pour repérer les structures. Les mesures magnétiques sur surface décapée nécessitent de s'en débarrasser afin de réaliser des mesures représentatives uniquement des variations du terrain. Il arrive souvent qu'après une ou deux pluies d'importants ruissellements sur la surface décapée recouvrent des objets contemporains. Dans le cas des nécropoles où les structures sont peu lisibles, les clous peuvent

être confondus avec d'autres objets archéologiques en métal. Il faut prendre soin d'utiliser d'autres marqueurs au sol ou de les retirer de la façon la plus exhaustive.

3.4.2 Intégration des structures fantômes dans la démarche archéologique

Que ce soit du point de vue pratique ou théorique, l'intégration des structures fantômes dans l'étude scientifique du site n'est pas évidente. L'absence de reconnaissance visuelle perturbe la démarche archéologique habituelle (Dziegielewski 2006). On peut proposer différentes solutions pour éviter des erreurs d'interprétation archéologique car les fonctions de ces structures peuvent être multiples (fig. 170). Il est alors important pour bien les caractériser de multiplier les approches en mesurant différents paramètres physiques avec une prise en compte de volumes de sols variables, tout en s'efforçant de les associer aux autres observations de terrains.

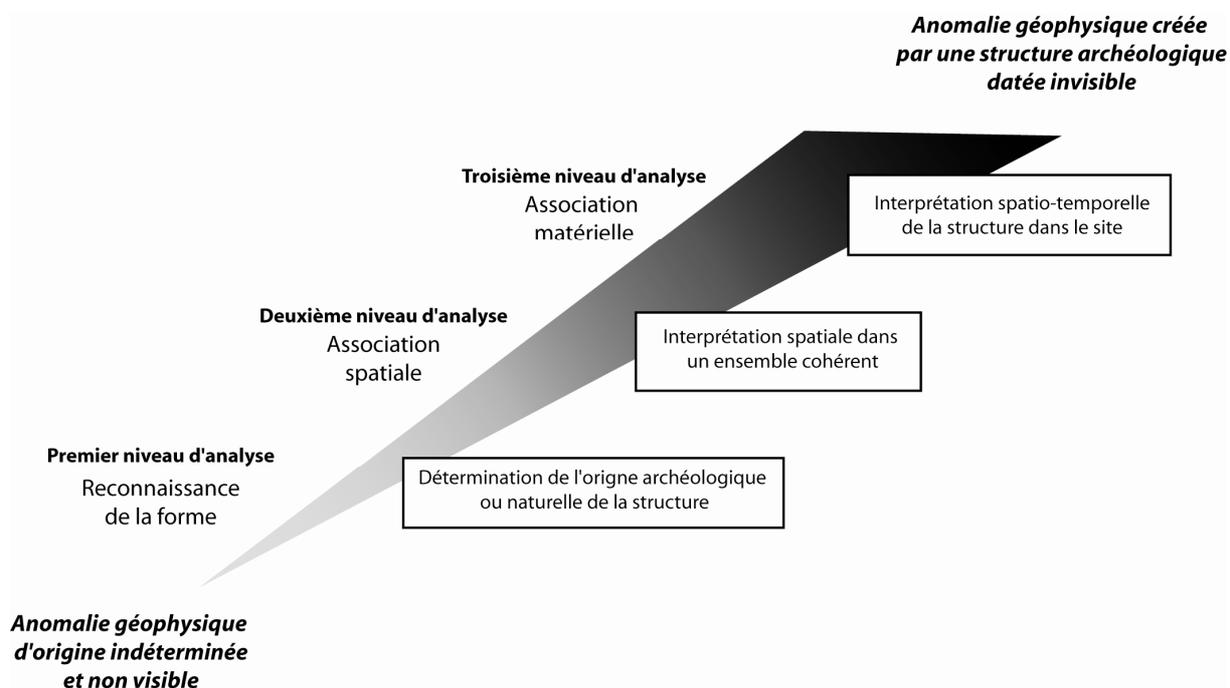


Figure 170 : Schéma récapitulant la gradation de la valeur de l'anomalie géophysique en fonction des corrélations spatiales, physiques ou matérielles

3.4.2.1 La corrélation spatiale entre les anomalies et les structures

L'anomalie correspondant à une structure fantôme peut prendre une place significative dans un ensemble de faits constatés. Dans ce cas, on peut l'intégrer, ce qui lui confère une signification archéologique. Cette pratique, nécessite d'évaluer la pertinence de l'ensemble de structures établi sur la base de comparaisons. Il faut se méfier d'interprétations hâtives, qui mènent vers des modèles archéologiques non justifiés (Ramseyer 2006). On devra éviter aussi que les possibilités apportées par la restitution en plan, n'entraînent une surinterprétation des anomalies.

Quelquefois, comme à Roeschwoog, l'assimilation de certaines structures se fait naturellement si celles-ci dessinent des formes ou des géométries particulières (alignements, plans de bâtiments). Ces corrélations permettent de donner de la validité aux autres anomalies présentes sur le site, non repérées visuellement, et sans lien cohérent avec les autres structures. A Duntzenheim, l'intérêt des cartes de susceptibilité magnétique a été souligné par la confrontation du plan des structures avec les zonages de susceptibilité magnétique. Il s'avère que les structures prennent des orientations concordantes avec limites des zones de plus fortes susceptibilité magnétique.

Les structures fantômes sont essentiellement des structures excavées. Elles doivent donc avoir des formes caractéristiques (enclos, fosse à angle droit) pour lever à elles seules le doute quant à l'existence d'un creusement naturel ou présenter des contrastes géophysiques très élevés.

3.4.2.2 La corrélation entre les anomalies et le matériel archéologique

Les structures fantômes s'apparentent à toutes les autres structures qui ne possèdent pas de matériel datant et qui ne peuvent être attribuées à une phase chronologique précise (Sellami, 2006). Pour les fantômes, en plus de l'incertitude entre structures archéologiques ou creux naturels, se pose le problème du bruit géologique ou instrumental. La corrélation anomalie/matériel peut être tentée après que la structure ait été reconnue sur le terrain, ou tout du moins testée manuellement, et dans ce dernier cas à l'aveugle. Son intégration dans les résultats archéologiques est alors largement simplifiée. Cette corrélation entre structures invisibles et objets se retrouve également dans les pratiques de terrain. Sur les nécropoles dans les contextes limoneux, où les contrastes entre structures et encaissant sont peu marqués, l'identification de certaines structures ne se fait que par le biais de découvertes de témoins matériels. Associer plusieurs méthodes pour préciser la reconnaissance archéologique de la structure n'est donc pas une solution inconnue.

A Sultz, un dépôt céramique isolé a été découvert à proximité de la fosse latérale du bâtiment rubané. L'association de ce dépôt avec une anomalie géophysique prouve que la fosse latérale est plus longue que ce qui avait été initialement observé.

3.4.2.3 La corrélation avec d'autres analyses

Dans le cas des prospections magnétiques, on va chercher à mettre en relation la structure archéologique, avec l'anomalie géophysique. Pour cela on peut réaliser des mesures pour déterminer les différentes propriétés magnétiques des sédiments (Pétronille 2010), qui doivent être complétées par une analyse minéralogique précisant la nature et la teneur en éléments présents, afin d'établir des liens entre propriétés magnétiques et constituants minéralogiques. On peut aussi y associer une étude sédimentaire (granulométrie, etc.). Celles-ci doivent comprendre des échantillons

de référence prélevées sur les niveaux de sols vierges. Enfin, une analyse micromorphologique pourra mettre en relation la signature magnétique avec les dynamiques de comblement et les éléments microscopiques contenus dans les sédiments. Il faut donc prendre garde à prélever des échantillons significatifs surtout dans le cas où les dynamiques de comblement ne sont pas homogènes à l'échelle de la structure. Cette dernière comparaison permettra d'attribuer une origine à l'anomalie archéologique.

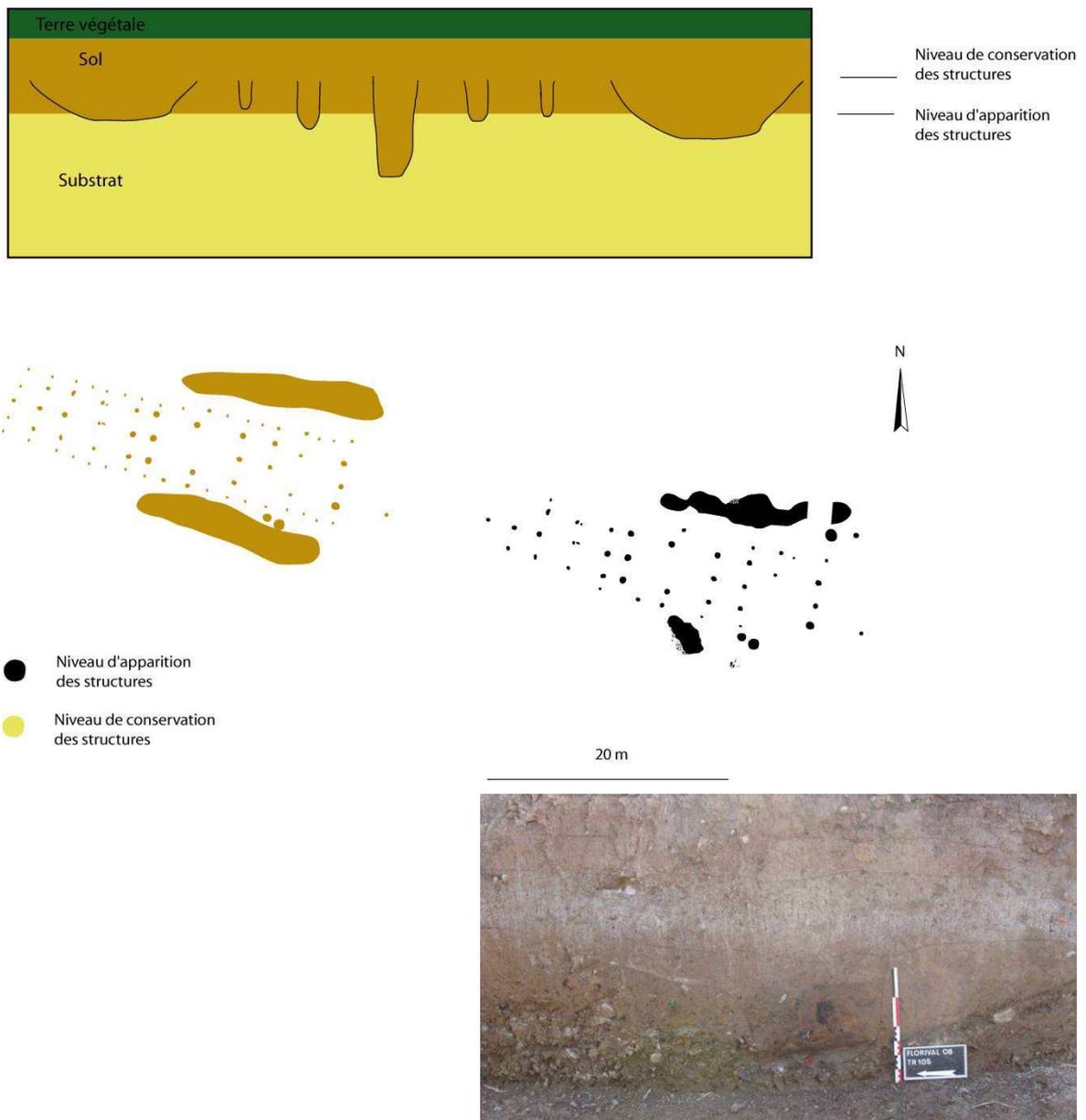


Figure 171 : Schéma présentant un état hypothétique de conservation à Sultz en brun et le niveau d'apparition des vestiges en noir. Les différences observées pourraient provenir de l'existence de structures dans les niveaux superficielles peu différenciés et lessivés (d'où les niveaux blanchâtre sur la photo présentant la coupe de la fosse latérale nord au cours du diagnostic) (cliché C. Peter).

Les seules mesures de susceptibilité volumique et de leur dépendance fréquentielle sur échantillons ne renseignent que partiellement l'origine du signal magnétique, mais les analyses complémentaires nécessitent l'intervention de plusieurs spécialistes. Un échantillonnage raisonné en fonction des structures, de leur signature, de leur environnement géologique serait une solution pour diminuer le coût global de cette approche.

3.4.2.4 Prévoir les fantômes géophysiques ?

Admettre l'existence de fantômes implique d'admettre que l'ensemble des vestiges ne peut pas être reconnu visuellement. En surface, avant décapage il n'y a pas moyen d'affirmer l'existence ou non d'une structure fantôme puisque la prospection ne permet pas de savoir lesquelles seront invisibles. De plus, toute mise en œuvre d'un autre système de reconnaissance ne peut que se heurter aux limites imposées par les contraintes de temps des projets d'archéologie préventive. La réalisation de prospections géophysiques en amont de l'opération de diagnostic peut permettre de disposer de données géophysiques que l'on pourra confronter aux observations de terrain. Lorsque les données géophysiques présentent plus d'anomalies que les structures observées, l'existence de fantômes doit être envisagée.

Avant la réalisation de mesures géophysique sur surface décapée, le matériel archéologique isolé peut aussi signaler l'existence de structures (s'il n'y a pas de niveaux de sol observés, comme à Roeschwoog, Soultz, Entzheim etc.). Sur un habitat stratifié, la prédiction de structures fantômes est encore plus complexe car les structures se chevauchent, le matériel n'est pas forcément associé à une structure, et la répartition hétérogène du matériel peut rendre la prédiction de structures fantômes difficile.

Sur le site de Roeschwoog, environ 70 structures (tâches limoneuses avec des inclusions de gravier dans un substrat gravelo-limoneux sombre) ont été localisées initialement. La prospection magnétique a mis au jour une trentaine de structures complémentaires. On peut donc très bien avoir sur un même site des différences dans l'aspect des structures alors qu'aucune explication ne peut être donnée quant à la distinction entre structures visibles et invisibles au niveau du décapage.

3.4.3 Estimer la présence de structures fantômes après décapage

On peut réaliser après décapage, sur les sites stratifiés, des mesures géophysiques pour estimer le nombre de structures ou détecter d'éventuelles limites de niveaux stratigraphiques. Elles soulèvent plusieurs problèmes en premier lieu un problème d'exhaustivité, toutes les structures n'étant pas forcément détectées (phénomènes récurrents qui s'avère particulièrement contraignant pour la prévision des moyens). De plus il faut distinguer les anomalies de surfaces des anomalies profondes.

On doit réaliser une prospection géophysique sur les niveaux décapés dans le cas où ceux-ci présenteraient un nombre important de structures qui n'avaient pas été détectées lors du diagnostic, comme à Duntzenheim, où la prospection a révélé un nombre de structures très supérieur à celui des structures déjà traitées. Cette approche montre bien la complexité du site et l'insuffisance des moyens pour son étude.

3.5 Conclusion

La systématisation des mesures géophysiques sur les surfaces décapées apporte un regard nouveau sur le phénomène des structures fantômes (fig. 171). Actuellement, leur détection reste très rare, peut-être en raison du peu d'études géophysiques réalisées sur surfaces décapées et dont la mise en œuvre est quelquefois difficile.

La prise en compte de la possibilité de présence de structures invisibles entraîne une fracture méthodologique quant à la façon d'appréhender un site archéologique. Le décapage des niveaux de recouvrement, jugés stériles sur la base d'une non-observation de structures, est complètement remis en cause si l'on admet que dans certains cas ces niveaux contiennent de l'information. La reconnaissance géophysique de structures et de niveaux archéologiques non visibles vient aussi renforcer l'idée que la lisibilité d'une structure peut largement varier d'un site à l'autre. La géophysique ne fait que mettre en évidence ces problèmes de lecture du terrain qui peuvent aller jusqu'à l'invisibilité complète d'une structure. Albert Hesse comparait la perception des structures archéologiques avec celle que l'on pouvait avoir de l'alcool dans l'eau. La distinction des deux substances ne peut se faire que par le biais d'un autre sens que la vue. On peut en conclure que la perception des structures archéologiques ne devrait plus se baser sur la seule perception de contrastes de couleur et/ou de textures mais aussi sur d'autres propriétés.

4 La prospection géophysique en diagnostic : Un outil de détection ?

Rappelons ici les objectifs du diagnostic. Cette phase d'étude préliminaire a pour but de détecter, caractériser, estimer l'état de conservation et dater le site. Pour ce dernier objectif, l'apport de la géophysique est nul, pour les deux autres au contraire, il semble être d'un apport substantiel.

Nous avons vu que la géophysique permettait la détection de structures et des niveaux archéologique invisibles, donnant du sens à certains ensembles de vestige. Néanmoins, dans certains cas il peut être difficile d'intégrer avec cohérence les résultats géophysiques à l'analyse archéologique. La prospection géophysique permet également de voir l'étendue du site au-delà des limites de la fouille, replacer celui-ci dans un contexte géomorphologique sur un grand espace et appréhender son territoire en dépassant les contraintes spatiales et administratives liées au projet d'aménagement.

Nombreuses sont donc les informations issues de prospections géophysiques utiles voire nécessaires à la compréhension du site. Dans la phase du diagnostic, au-delà de la comparaison entre géophysique et sondage systématique, il est bon de se demander en quoi la géophysique peut venir préciser la reconnaissance et la caractérisation des sites alors que leur diversité et leurs contextes, quelque fois difficiles à identifier préalablement à toute opération, imposent de nombreuses adaptations méthodologiques (Kattenberg 2000 ? Hey and Lacey 2001).

Pour cela nous allons essayer d'établir une comparaison avec les résultats obtenus par la méthode de tranchées, et tenter de cerner les limites de l'outil dans le cadre méthodologique et pratique sur le terrain. Enfin nous aborderons les façons de mettre en œuvre cet outil dans le cadre du diagnostic en s'efforçant d'estimer l'impact, positif ou négatif, qu'il peut avoir sur le résultat final du diagnostic, indispensable à la bonne conduite de la fouille (Gaffney *et al.* 1991).

4.1 L'apport de la géophysique

4.1.1 La vision générale du site

Un des intérêts majeurs de la géophysique, par rapport à la méthode du sondage systématique en tranchée, est la vision générale du site qu'offre la cartographie d'une ou de plusieurs propriétés physiques. Le site est appréhendé dans un cadre plus large que celui des sondages ponctuels aléatoirement répartis sur l'ensemble de l'emprise. Néanmoins on ne peut espérer que la géophysique nous révèle toutes les structures sous-jacentes, (Dambach, Houssen) et les résultats de la prospection sont dépendants du contexte géologique et géographique ainsi que de la nature des structures.

Les données géophysiques révèlent des traits de l'organisation d'un site, qui, compilée avec d'autres informations (LIDAR, photo aérienne), peut faciliter une vision globale de l'extension et de l'organisation spatiale. Ces données ne sont pas directement représentatives des vestiges mais de leurs

propriétés physiques : une carte géophysique est une représentation d'une distribution de propriétés physiques dans le sol, modifiée par l'existence de vestiges. Il faut donc associer exploitation exhaustive des données géophysiques et pertinence archéologique de l'interprétation.

La vision du site apportée par une méthode géophysique est globale et bien échantillonnée elle permet donc sans risque de biais de prendre en compte dans l'interprétation du terrain les informations connues antérieurement : les « pré-acquis ». Elle s'oppose en cela à la méthode du diagnostic telle qu'elle avait été établie dans les années 90, qui devait être appliquée sans tenir compte des indices de sites qui auraient pu biaiser la perception du terrain. Il a été envisagé de tenir compte de la topographie et de l'environnement du site pour implanter les sondages. Une approche sans pré acquis se traduit par une méconnaissance totale volontaire des contextes géologique et géographique. Cette méthode est aujourd'hui contestée (CIRA 2009). En effet, la connaissance de certains indices en amont de l'opération permet de raisonner l'implantation des sondages, ce qui n'exclut pas de prendre en considération les limites de ces pré acquis, par exemple en sondant les zones de vides ou, dans le cas où une prospection géophysique a été faite en prenant en compte les limites propres à la méthode employée pour la détection des vestiges archéologiques. Les zones fortement érodées, même si elles présentent un potentiel de découvertes moins importantes sont toujours susceptibles de livrer des vestiges même mal conservés ou altérés.

La caractérisation des vestiges doit alors servir de base de réflexion pour une approche raisonnée des sondages systématiques. Tout en respectant un taux d'ouverture fixe, par exemple à 10 %, il faut essayer d'identifier les anomalies et préserver les vestiges.

4.1.2 La localisation des structures isolées

Les cartes géophysiques peuvent couvrir la totalité de l'emprise du diagnostic, avec l'avantage de pouvoir localiser toutes les structures détectables (ce qui dépend du contexte, du volume et du contraste des structures archéologiques) : avantage précieux étant donné la limite statistique du sondage systématique.

Le pourcentage d'ouverture préconisé pour le diagnostic est suffisant pour détecter les sites majeurs mais ne repère pas de façon exhaustive l'ensemble des structures d'occupation. La visualisation partielle des vestiges nécessite donc d'extrapoler les résultats observés en fonction de leur densité (sur 90 % du site). L'ouverture par tranchée est particulièrement adaptée à la reconnaissance des fortes concentrations de structures où l'extrapolation pose peu de difficultés, l'ensemble du site pouvant être considéré comme homogène, mais dans la plupart des cas, la densité de structures sur le site est hétérogène voire disparate. Le rendu de l'extrapolation est alors peu significatif même dans le cas d'une ouverture à 10 %, le résultat étant sous-échantillonné par rapport à la distribution spatiale des structures. Pour la caractérisation des ensembles funéraires par exemple

(fig. 172), chaque structure doit faire l'objet d'une étude précise et longue lors de la fouille. Il faut donc pouvoir déterminer avec exactitude au cours du diagnostic le nombre de sépultures, ce qui est difficile étant donné la variabilité de la répartition spatiale (Delattre, 2007). Dans quelques cas, la géophysique pourrait aider à l'identification du nombre de structures.

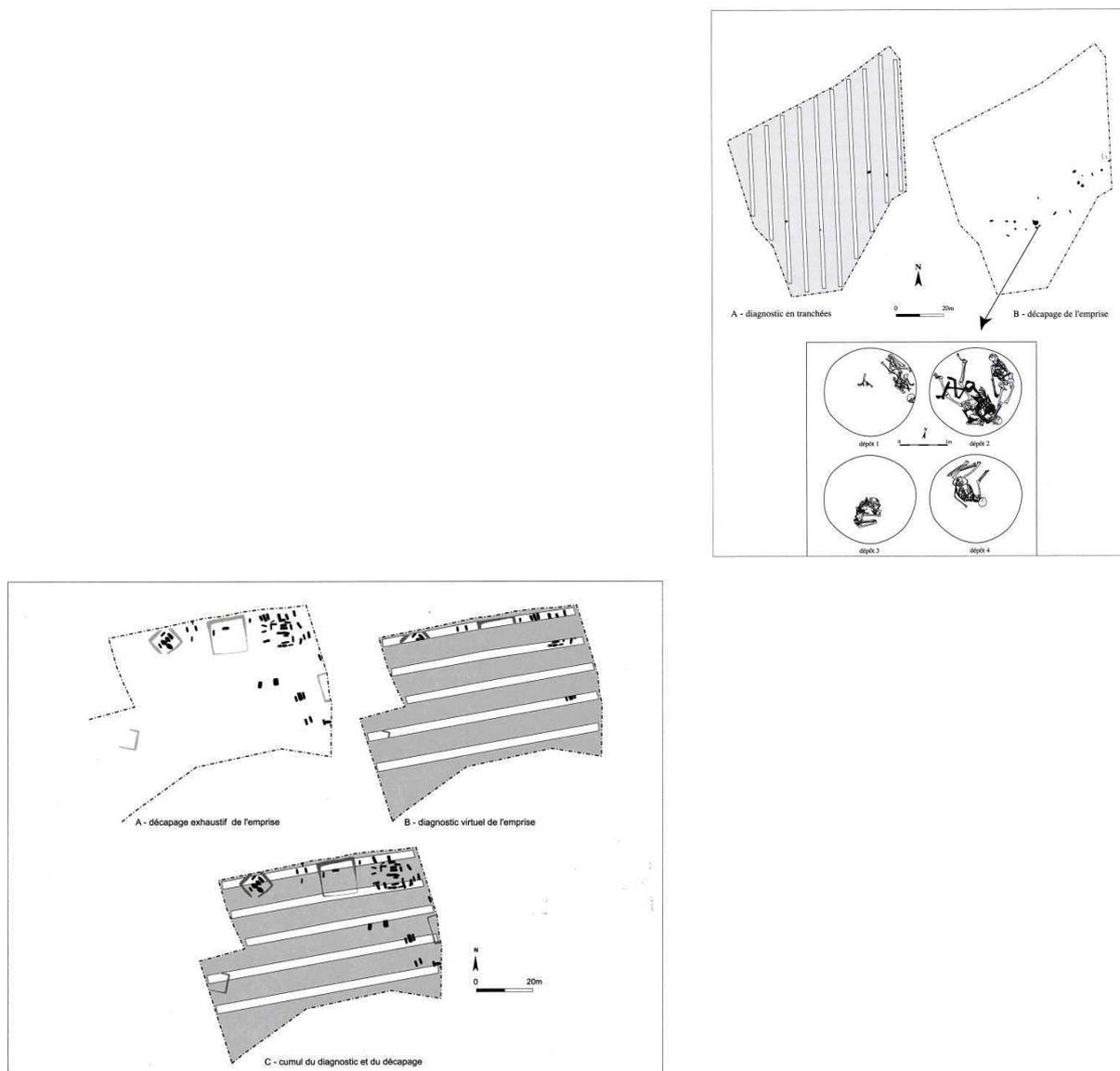


Figure 172 : Le diagnostic des ensembles funéraires : Sont présentés ici deux cas de figures, en haut un cas défavorable où le diagnostic n'est pas en mesure de repérer les sépultures isolées dispersées entre les tranchées. En bas un cas positifs, les sépultures sont réparties selon de fortes densités et des orientations préférentielles (Delattre 2007).

Si la géophysique était en mesure de détecter l'ensemble des structures isolées on pourrait la considérer plus à même de caractériser le site que les sondages mécaniques. Néanmoins, les sites présentent rarement des structures avec des caractéristiques communes et il reste rare - voire improbable - de réaliser une détection géophysique exhaustive : les sites comptent souvent une faible densité de vestiges et des structures fugaces ou de petites tailles comme les trous de poteau, généralement invisibles en géophysique.

On distinguera deux situations relatives à la détection par la géophysique de structures isolées :

Dans le cas d'une structure isolée, même si son existence est avérée par les données géophysiques, une vérification par sondage est nécessaire (il faut néanmoins juger au préalable de la nécessité de la tester).

Dans le cas de structures dispersées, une structure, qui aurait pu paraître isolée à l'échelle d'une tranchée, est réinscrite par la cartographie géophysique dans le groupe alors aisément identifiable car la proximité d'autres anomalies accrédite sa nature archéologique. C'est le cas des séries dispersées de fosses, et ce même si l'interprétation des anomalies reste à vérifier par la fouille : interprétation et observation directe des vestiges sont deux choses différentes.

La présence d'une seule anomalie n'implique pas qu'elle soit générée par une structure isolée. Il pourrait s'agir d'un ensemble de structures de petites dimensions non identifiables, dont une seule serait détectable. Il faut donc rester prudent dans l'interprétation des structures isolées : Elles ne peuvent être que la partie visible d'un ensemble et nécessitent un test mécanique ou au moins une caractérisation géophysique multi-paramètres. Une fois qu'on s'est assuré de la détection d'une anomalie, encore faut-il pouvoir en identifier la cause, on a là un problème important accentué par la forme souvent peu significative des structures isolées. A tous ces problèmes de détection et d'identification s'ajoute l'intérêt porté à ce type de découvertes : si les structures font en fait partie d'un vaste ensemble peu dense, leur détection est primordiale ; si elles sont vraiment isolées il faut pouvoir préciser leur nature à partir de la géophysique, sans quoi une ouverture par tranchées est nécessaire.

L'utilisation conjointe de la prospection géophysique et des sondages mécaniques offre néanmoins une alternative à l'extrapolation systématique du nombre de structures observées dans les sondages, pour estimer la densité de vestiges sur l'ensemble du site.

4.1.3 L'extrapolation des structures entre les tranchées

Associés aux résultats des sondages mécaniques, la prospection géophysique précise la reconnaissance des structures mises au jour, renseignant par exemple leur prolongement hors tranchée, leur forme complète, ou leurs dimensions (fig. 173). Cet avantage lié à l'extrapolation est valable tant pour les structures linéaires (fosses, murs), que pour les fosses, les empierrements etc. La géophysique peut par exemple faciliter la distinction entre fosses et fossés souvent difficiles à distinguer compte tenu de la largeur de la tranchée.

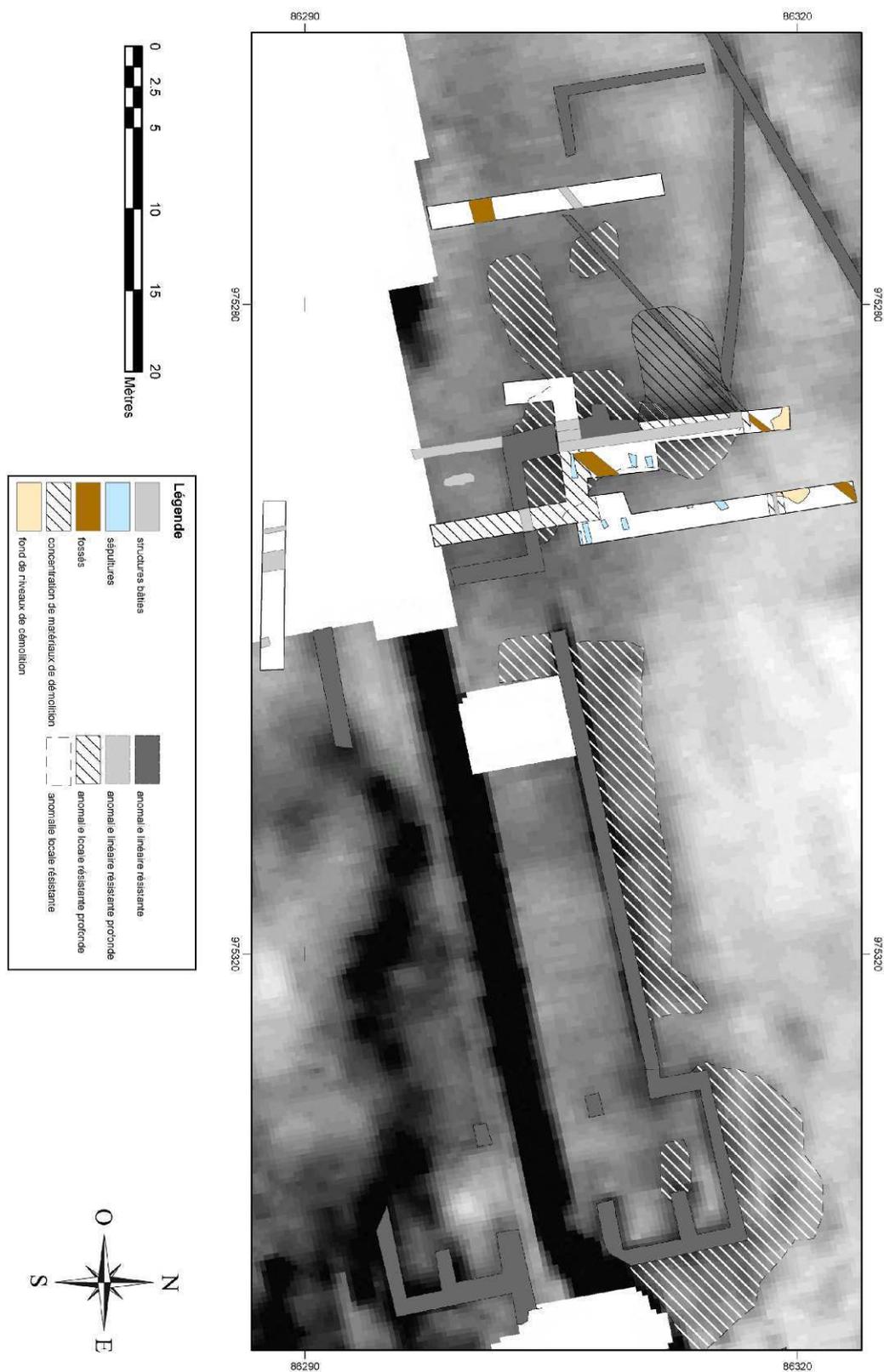


Figure 173 : Combinaison des résultats de prospection électrique et des sondages archéologiques sur le site médiéval de Bernardvillé. Les sépultures prennent place au nord de l'église, dont le plan n'a été révélé que par la géophysique (fond F. Reutenauer)

Pour le bâti, l'organisation des structures linéaires peut présenter des géométries complexes difficilement appréhendables par le biais des sondages : la géophysique peut faire le lien entre les sections d'éléments détectés et les mettre en relation avec les aménagements en dehors des sondages mécaniques pour déterminer le plan des aménagements anciens (Steinbourg, Duntzenheim).

Certaines prospections ont révélé des incohérences dans les résultats d'anciens diagnostics (Sainte-Croix-en-Plaine, Bernolsheim) où il arrive que certains fossés aient été recoupés par plusieurs tranchées dans lesquelles ils n'ont pas été systématiquement reconnus (Dambach) ou que des sections de fossés aient été interprétées comme des enclos circulaires alors qu'il s'agit de fossés rectilignes. Ces différences entre géophysique et sondages s'expliquent par les difficultés de lecture des structures, dues aux conditions d'observations (contrastes au sol, météo, etc.). On peut également mettre en relation le prolongement de certaines structures archéologiques avec des anomalies géophysiques (invisibles lors de l'ouverture), lorsqu'elles présentent une organisation et une orientation compatible.

4.1.4 La détermination de l'extension du site

Pour déterminer l'extension d'un site il faut au préalable définir ce qui matérialise ses limites. Cette question dépasse le simple problème de la détection et aborde des notions subjectives. On peut néanmoins considérer que le site est le secteur le plus dense en vestiges par opposition à un extérieur où la densité est nettement plus faible, bien que cette définition reste discutable.

Très souvent, les prescriptions de fouilles ne tiennent pas compte des limites de sites mais plutôt d'une limite de densité des vestiges jugés les plus intéressants. Pourtant la reconnaissance de l'extension est largement explicitée dans les objectifs du diagnostic : évaluation de la densité planimétrique et stratigraphique (d'où les difficultés rencontrées lorsque celles-ci ne sont pas homogènes) ; détermination de la chronologie et de l'extension du site.

Une forte densité de vestiges est en général bien reconnue par la méthode des sondages systématiques, mais il est plus difficile de délimiter son extension, surtout lorsque le site présente en périphérie des structures plus fugaces et ténues et très souvent plus diffuses qu'au cœur même de l'occupation. La détection par sondages systématiques pose aussi le problème de la reconnaissance des secteurs sans structures dont il convient de déterminer la nature (zones archéologiques dédiées ou limite du site). Il est aussi quelquefois difficile de reconnaître par le biais des sondages les relations qui peuvent exister entre le site et le paysage (parcellaire, agencement des structures et système hydrographique, etc.) à la périphérie de l'occupation.

La géophysique peut souvent préciser la délimitation de l'occupation. C'est particulièrement simple quand une structure, fossé ou mur, limite le site. Néanmoins, le critère de densité reste la référence générale. La caractérisation géophysique devient surtout plus difficile lorsque la taille des vestiges périphériques diminue. Le problème de détection des structures peut être également modulé

par les évolutions du milieu sédimentaire encaissant : c'est le cas des contextes argileux qui atténuent le signal magnétique. On a pu observer sur plusieurs opérations que les variations de faciès pouvaient entraîner des différences d'efficacité d'un point à un autre. L'atténuation du signal, voire sa disparition totale entraîne des confusions entre détection des structures et délimitation du site. Il faut donc toujours pouvoir caractériser toutes les variations du contexte géologique, ce que la géophysique réalise plutôt bien.

Pour des sites qui ne présentent pas de variations de faciès géologiques, la géophysique donne l'occasion d'appréhender complètement les espaces sans avoir à caractériser les variations pédo-géologiques et leurs incidences sur la détectabilité des structures archéologiques, et de déterminer les zones où la concentration en vestiges est très faible comme celles qui en sont dépourvus (toujours dans l'hypothèse où les structures présentent un niveau de détectabilité suffisant ou qu'elles sont associées à des éléments permettant de distinguer le site d'après les mesures géophysiques). Cette sensibilité aux différences de concentration de vestiges autorise la définition de l'extension des espaces anthropisés. La reconnaissance des différentes densités de vestiges est nécessaire à la compréhension des territoires et des grands espaces.

4.2 Les limites de la géophysique

Par référence à une pratique de diagnostic basée sur les sondages systématiques, la prospection géophysique comble indiscutablement des lacunes. Néanmoins, son efficacité est modulée par le contexte géologique et environnemental et limitée par les caractéristiques physiques (taille des structures, profondeurs, contrastes, etc.) problèmes auxquels s'ajoutent les difficultés d'interprétation et de mise en relation entre anomalies et structures archéologiques (Hesse 1999).

4.2.1 Les variations de faciès géomorphologique

La variabilité géomorphologique du territoire alsacien entraîne de nombreuses variations de faciès (Obernai, Roeschwoog, Bernolsheim) or les phénomènes géomorphologiques et sédimentaires, déterminent plusieurs des propriétés physiques des sols. Dans le nord de l'Alsace, on a pu observer la présence d'affleurements calcaires et marneux sur le sommet des collines, des plaquages de loess sur les versants et des colluvionnements dans les vallons, sur lesquelles s'étendent les sites. Dans la plaine on rencontre des niveaux argileux en bordure des chenaux liés aux inondations et des niveaux sableux qui caractérisent leurs comblements. Ces variations géomorphologiques n'ont pas systématiquement d'incidence sur l'installation de l'occupation humaine : il se peut que la même occupation soit traversée par d'anciens bras de paléochenaux, des barres de graviers, des zones d'accumulations d'argiles etc., favorisant ou limitant la formation des contrastes. Ces différences de faciès peuvent

entraîner une variabilité des contrastes géophysiques et rendre plus délicate la phase d'interprétation. Pour que les prospections soit pertinentes il est nécessaire de connaître précisément leur variabilité en les cartographiant sachant que pour la résistivité électrique elles sont toujours corrélées à la fraction argileuse.

Pour cartographier ces variations du milieu géologique on utilise de préférences des méthodes à large maille et on prend en compte une épaisseur significative de sous-sol, 5 m environ avec l'appareil électromagnétique EM31 par exemple. Cet appareil peut aussi rendre compte de façon satisfaisante de la variabilité de la conductivité en surface si elle est assez marquée. On peut préciser la puissance stratigraphique des entités géologiques en réalisant des sondages électriques ou des pseudo-sections de résistivité pour des structures plus complexes (chenaux, etc.), cette information verticale vient compléter la caractérisation de la formation superficielle dans son ensemble.

Les zones argileuses, sont défavorables au signal magnétique, la présence d'eau favorisant la dissolution des grains magnétiques alors que dans les zones sableuses les contrastes de résistivité présentés par les structures empierrées se trouvent réduits. Les différences entre anomalies sont aussi à mettre en rapport avec la nature des structures. Pour les mesures de résistivité électrique, en plus de porter sur les contrastes entre structures archéologiques et encaissant géologique, les variations de faciès entraînent des variations sur les profondeurs d'investigations qui sont à prendre en compte dans l'interprétation des résultats.

Sur le site de Duntzenheim, des faciès diversifiés se développent sur deux versants qui se font face. La détection des murs antiques dans l'argile est aisée alors qu'à l'inverse les mêmes bâtiments sont difficiles à distinguer dans les colluvions. Le site de Steinbourg présente une nette différence de faciès entre les niveaux argileux sur les sommets, les colluvions en bas de pente et une zone sableuse à l'est. Ces variations ont provoqué des différences majeures pour la détection des vestiges. Sur le secteur argileux de la *villa*, la méthode électrique a caractérisé avec efficacité les murs et les empièvements. Au contraire le recouvrement sableux en bas de pente a atténué les contrastes correspondants à ce type de structures. A Bernolsheim une terrasse de graviers comprise entre deux dépôts limoneux, a révélé la majeure partie des structures, en raison de son faible recouvrement. La limite du site semble correspondre au nord à la bordure de la terrasse malgré la faible lisibilité des structures pauvres en matériel peu visibles et difficiles à détecter en géophysique.

Connaître les variations de faciès lors de la phase des sondages est particulièrement intéressant. En comparant les données géophysiques et les observations géologiques, on est en mesure d'estimer la potentialité géophysique de chaque secteur.

4.2.2 L'influence des paramètres extérieurs

Les occupations récentes ont souvent entraîné des « pollutions » pouvant influencer sur les résultats géophysiques. Les sols sont très souvent plus marqués par l'occupation actuelle que par les occupations anciennes. Aux réaménagements du sol peuvent venir s'ajouter des perturbations variées : ponctuelles et proches comme des éléments métalliques en surface, ou lointaines et perturbant le fonctionnement des appareils (champ électromagnétique et courant dans le sol associés aux lignes à haute tensions, etc.).

L'impact le plus gênant que nous ayons pu observer sur les cartes magnétiques est l'omniprésence de déchets en fer aléatoirement a priori répartis sur les parcelles, provoquant ce que l'on nomme du bruit de sol (qui s'associe alors au bruit de sol microtopographique beaucoup moins fort). Ces perturbations ont été essentiellement observées dans les zones périurbaines (Horbourg-Wihr, Obernai, Houssen) et sont associées à l'impact des habitations périphériques (Ciminale *et* Gallo 2006). Les résultats géophysiques sont alors totalement dépendants du type de vestiges et de la profondeur des structures sources des anomalies, dont l'amplitude doit être suffisamment importante pour se démarquer du bruit ambiant. A Horbourg-Wihr, l'interprétation a pu être réalisée malgré le niveau de bruit élevé contrairement à Houssen et Obernai, où ce bruit n'a pas permis la détection de vestiges. Dans le premier cas, bien que peu élevé, celui-ci est associé à un contexte géologique qui ne génère pas de contrastes assez importants alors que dans le deuxième cas il était tel que les vestiges qui présentaient pourtant des contrastes apparemment suffisants n'ont pas été détectés.

On a également observé ce niveau de bruit dans des secteurs éloignés de toute habitation causé par l'épandage de déchets tri-compostés où des éléments en fer ont probablement été répandus sur les terres agricoles. Sur le site de Dambach, le niveau de bruit a empêché la détection des structures archéologiques découvertes lors du diagnostic comme des fours. Une prospection sur un diagnostic proche prouve que ce niveau de bruit très élevé est associé à une pratique agricole. Par extension, les zones de conflits de la Première Guerre mondiale diagnostiquées au cours de l'année 2011, n'ont pas fait l'objet de prospections magnétiques, rendues inefficaces par la pollution métallique de surface.

Les données magnétiques sont également particulièrement sensibles à toutes les servitudes contenant des artefacts en fer qui peuvent dissimuler les anomalies archéologiques lorsqu'elles sont à proximité d'un site. Elles sont cependant très localisées et n'empêchent en général la détection que d'une partie du site. C'est le cas des systèmes de drainages, des aménagements agricoles enterrés et des clôtures.

Les autres techniques de prospections (EM, électrique) ne sont pas aussi sensibles à ces niveaux de bruits magnétiques au sol. Par contre, comme pour la méthode magnétique, elles sont perturbées par les champs électromagnétiques générés par des lignes de haute tension. L'utilisation de

magnétomètres dans une configuration pseudo-gradient permet de limiter l'effet de ces perturbations que l'on peut aussi atténuer par un traitement informatique.

Les appareils électromagnétiques possèdent en général un filtre fréquentiel rejetant le 50 Hz et ses harmoniques. Le problème est amplifié à proximité de la source, là où les amplitudes ne sont pas uniformes. Cet effet peut généralement être atténué mais rarement totalement effacé. Les pertes de courant dans le sol entraînent aussi une instabilité des mesures de résistivité électrique : il est alors nécessaire d'accumuler (*stacking* en anglais) les mesures pour atténuer ces variations, particulièrement importantes à proximité des aménagements modernes. Le bruit de sol n'est pas seulement d'origine anthropique : il peut être causé par l'état des terrains (anciennes souches perturbées par la mégafaune), des éléments géologiques (affleurement de roches volcaniques magnétiques, etc.)

Les prospections électriques et électromagnétiques sont sensibles à ces phénomènes car le travail des sols modifie la résistivité électrique. Un terrain labouré sera par exemple très peu propice à la réalisation de prospection car les hétérogénéités de surface entraînent un bruit très important. Les variabilités saisonnières viennent s'ajouter à ces modifications par les traitements agricoles, les sols secs empêchent la circulation du courant en surface et peuvent provoquer un niveau de bruit très élevé dû à la récurrence des valeurs aberrantes, tout comme les niveaux de terres gelées. L'Alsace étant particulièrement chaude et sèche en été, on y observe souvent un assèchement important des sols, alors qu'en hiver le gel provoque de très fortes résistivités des sols.

Enfin, les mesures peuvent aussi être « bruitées » par les difficultés rencontrées lors des prospections sur des surfaces peu adaptées (présence d'une végétation importante, buissons, etc.). La réalisation des prospections est alors beaucoup plus longue.

4.2.3 Différence entre le nombre de structures et le nombre d'anomalies

La détection des structures dépend de la géologie du terrain (c'est-à-dire des contrastes) ainsi que de leur taille et de leur profondeur. Ainsi, au sein d'un même ensemble, le nombre d'anomalies détectées peut différer du nombre de structures. Il faut donc rester prudent sur les zones a priori positives en géophysique.

Le nombre d'anomalies est étroitement lié au nombre de structures, ou tout du moins la densité d'anomalies est représentative de la densité des structures archéologiques. Parfois, les anomalies géophysiques ne correspondent pas aux structures découvertes dans les tranchées mais peuvent néanmoins former un ensemble cohérent du point de vue spatial. Il est alors très difficile d'intégrer ces observations dans l'interprétation archéologique de ces structures qu'on ne peut appréhender que par la géophysique. Ce cas a été rencontré à Ensisheim mais n'est pas récurrent.

Sur le site d'Ensisheim, plusieurs anomalies sont générées par des structures archéologiques funéraires. Dans le même encaissant et avec les mêmes dimensions, certaines structures n'ont pas pu être détectées en géophysique : cette différence est due à des variations de comblement magnétique causés par des dynamiques de comblements voire par des gestes funéraires différents. Il faut donc porter une attention particulière à la relation entre structures et anomalies géophysiques, le nombre de structures devant être estimé le plus précisément possible pour la fouille, surtout dans le cas des ensembles funéraires. Ce problème de représentativité s'ajoute à celui de l'interprétation des anomalies et de leur attribution à un fait archéologique ou naturel.

4.2.4 L'interprétation conjointe des données archéologiques et des observations de terrain – mise en évidence des limites théoriques pour chaque méthode

L'interprétation conjointe des différentes informations lève le doute sur la nature des anomalies : structures ou creusements naturels. Ces observations peuvent ensuite être extrapolées à l'échelle du site archéologique ou du secteur, surtout lorsque ce dernier est dense en vestiges. Par une étude interdisciplinaire, les anomalies détectées lors de la prospection ont plus de chance d'être correctement interprétées et la prospection donne une cohérence spatiale aux structures découvertes dans les tranchées de diagnostic.

Il faut bien tenir compte des zones de vides, les tester, y rechercher des informations qui justifieraient le constat géophysique de l'absence de vestiges. Un secteur sans anomalies sur une terrasse de gravier très peu profonde recouverte par des limons a peu de chance de cacher des structures archéologiques, à l'inverse des zones argileuses humides. A partir des sondages mécaniques, il faut donc pouvoir étayer les hypothèses sur la formation des contrastes et évaluer le risque d'absence d'anomalies, évaluation qui doit tenir compte des structures de petite taille, impossible à détecter. Il faut également prendre soin de réaliser des sondages dans les zones où on a pu observer des anomalies archéologiques pour estimer la probabilité de détection de telles structures. Ces tests précisent les critères d'identification des anomalies.

Cette complémentarité donne une validité aux résultats géophysiques et une cohérence qui dépasse de loin la seule comparaison entre résultats géophysiques et observations des sondages systématiques. Dans le cas de Houssen, les tranchées ont dégagé un niveau argileux anaérobie où les contrastes de propriétés magnétiques ont largement atténués ce qui explique l'inefficacité de la méthode magnétique et où les comblements des structures sont de même nature que les niveaux environnants. Sur le site d'Ensisheim, l'ouverture a précisé la nature archéologique des anomalies géophysiques, puis en bordure ouest a permis l'identification de nombreuses anomalies qui présentaient un signal aussi fort mais une géométrie légèrement différente, moins uniforme, qui se sont avérées d'origine « naturelle ».

4.3 L'utilisation et la mise en œuvre de la géophysique

Nous avons vu les avantages et les limites de la géophysique pour le diagnostic archéologique. Son intérêt est bien démontré mais sa mise en œuvre reste complexe : certains préfèrent encore se défier de tout a priori spatial qui pourrait biaiser leur perception du terrain.

L'outil géophysique apporte pourtant des informations non négligeables pour la compréhension d'un site bien qu'il ne s'agisse pas d'une méthode de reconnaissance, efficace à 100 % et en mesure d'estimer l'ensemble des moyens nécessaires à une fouille, en raison de son absence de spécificité archéologique : elle montre comment est structuré le sous-sol sans effacer les informations géologiques ou environnementales. Le but de cette réflexion n'est pas de remettre en question le diagnostic par sondage mécanique, méthode indispensable à l'évaluation des terrains (Dubouloz 2003), mais de réfléchir à l'intégration d'un nouvel outil dans les pratiques de terrain.

4.3.1 Implantation des tranchées et de leur impact sur la caractérisation des vestiges archéologiques



Figure 174 : Implantation de tranchées de diagnostic en quinconce sur le site de Scherwiller (clichés PAIR)

Les avantages de la prospection géophysique n'ont de sens que parce que ses résultats comblent les lacunes de l'ouverture par tranchées systématiques car cette pratique est considérée comme « une méthode absolue » (Robert 2000), sa mise en œuvre permettant de répondre aux contraintes économiques et scientifiques imposées. L'avantage du diagnostic par sondage systématique est qu'il permet de reconnaître les caractéristiques du terrain par une visualisation directe du sous-sol. Il permet également de récolter des éléments matériels permettant la détermination chronologique du site.

L'approche statistique est basée sur l'estimation à partir de 5 à 10 % du terrain, de la présence et de l'organisation des vestiges sur l'ensemble de la parcelle concernée par le projet d'aménagement.

Cette proportion est jugée suffisante pour répondre aux problématiques du diagnostic (détection, caractérisation, datation). La méthode d'échantillonnage adoptée pour le diagnostic a été établie sur la base du temps nécessaire à sa réalisation, de la probabilité de détection des structures, et du coût de l'opération. Aujourd'hui on tend plutôt à appliquer un taux d'ouverture de 10%, en Alsace, car il permet de mieux cerner l'organisation et la richesse des vestiges tout en augmentant les chances de découvrir du matériel datant.

Les sondages systématiques doivent permettre de repérer les ensembles de structures, et, par la réalisation de fenêtres, de préciser l'organisation et la densité. Cependant, en fonction du type de vestiges et de leur répartition, cette méthode s'avère plus ou moins efficace. Elle détecte quasiment l'intégralité des sites que l'on observe lors d'un décapage total, mais il arrive couramment que leur caractérisation, nécessaire à l'évaluation des moyens requis pour la fouille, soit mal définie, ce qui engendre des problèmes de traitements des structures (avec soit une redéfinition du projet soit dans des cas plus complexes une perte d'informations).

La réalisation de fenêtres complémentaires sur les zones qui présentent les plus denses concentrations de vestiges se traduit par un sous-échantillonnage des zones « négatives » souvent constaté sur les opérations de diagnostic à pourcentage d'ouverture fixe (Roeschwoog, Ensisheim). Ce sous-échantillonnage dû au suréchantillonnage des zones positives entraîne également des différences de représentativités des vestiges observés au sein d'une parcelle.

Des tests statistiques ont tentés de valider les géométries utilisées (Marmet 2002, Verhagen 2009). Les tranchées longues permettraient de mieux rendre compte de l'organisation spatiale que les tranchées courtes disposées en « quinconce » (fig. 174). Cette conclusion reste critiquable en fonction des sites et de leurs caractéristiques. Alors que la géométrie des tranchées est peu discutée, on observe sur la plupart des opérations en Alsace une implantation des tranchées dites en quinconce, qui présentent des avantages pour la détection des différentes orientations préférentielles des vestiges et le plus petit espacement entre les tranchées entraîne alors une meilleure localisation des secteurs denses. L'association de tranchées longues et de tranchées en quinconce semblerait être un compromis idéal entre représentativité des vestiges, visualisation de l'extension des structures et compréhension de l'organisation spatiale (Bonvalot 2010). La géométrie doit cependant être adaptée à chaque étude et c'est à l'archéologue de définir la méthode la plus adaptée. Elle est néanmoins difficile à prévoir sans connaissance préalable du terrain et de ses vestiges probables. Quelques tranchées perpendiculaires semblent être un bon compromis entre le faible encombrement causé par le déplacement de la pelle pour la réalisation des tranchées et la rapidité de l'intervention. Cette pratique d'ouverture à 10 % tient peu compte du souci de préservation des vestiges : la nature des vestiges et leur recouvrement occasionnent souvent des dommages importants sur les vestiges.

Dans certains cas, les particularités du site entraînent des difficultés plus conséquentes. Les nécropoles représentent un cas particulier et leur traitement soulève un ensemble de questions relatives à l'efficacité du diagnostic. Les architectures funéraires conséquentes facilitent le travail de

reconnaissance mais la détection s'avère plus complexe pour les fosses de sépultures et d'incinérations « désordonnées » sans orientation préférentielle: pour réaliser une fouille bien préparée, on attend entre autre à l'issu du diagnostic une évaluation précise du nombre de structures. Pour les niveaux stratifiés, le diagnostic en milieu rural s'avère moyennement efficace et complexe à mettre en œuvre car il implique de choisir entre préservation et caractérisation des vestiges. Le dernier problème est relatif à la lisibilité des structures, quelquefois fugaces (largeur des tranchées trop exigües, contraintes météorologiques (fig. 175).



Figure 175 : Deux cas de figures de péjoration des conditions météorologiques ayant pu avoir une incidence sur l'observation des vestiges (clichés F. Bonvalot)

4.3.2 La gestion d'implantation des tranchées : entre impact et préservation ...comment optimiser l'implantation des sondages ?

La méthode du diagnostic repose sur un réel paradoxe : il s'agit de reconnaître un maximum de vestiges en utilisant des techniques intrusives, tout en préservant le site et ses informations pour la fouille à venir. De plus si l'investigation est trop légère les vestiges s'en trouveront mal caractérisés.

La visualisation du terrain par la géophysique en amont permet de faire des choix raisonnés quant à l'implantation des sondages. On peut ainsi contrôler l'impact de la pelle mécanique sur les vestiges détectés et diminuer l'aléa induit par la méconnaissance du site. Néanmoins, même avec toutes les précautions nécessaires pour sauvegarder au maximum les structures, la pelle entraîne toujours une détérioration, parfois seulement superficielle.

Les résultats géophysiques ne sont pas systématiquement pertinent tout comme les autres méthodes. Dans certains cas, la géophysique fournit des indices évidents : on peut alors tenir compte en amont de l'existence probable de vestiges. Dans la plupart des cas, la géophysique est efficace mais n'est pas en mesure de distinguer l'ensemble des structures spécifiquement archéologiques.

A partir de résultats géophysiques, des sondages sont nécessaires pour préciser l'organisation des vestiges et valider la prospection : l'ensemble des vestiges ne générant pas forcément un contraste

géophysique. Le problème des structures fantômes, détectées par la géophysique, est plus difficile: il s'agit d'estimer leur intérêt alors même que les observations de terrains ne permettent pas d'en déterminer les caractéristiques. Les difficultés de lecture sont alors à prendre en compte dans la définition de la méthode de fouille : même si le nombre de structures fantômes est bien moindre que celui des structures bien visibles par des contrastes visuels forts. Il est cependant intéressant de considérer ces objets dans la démarche archéologique et d'essayer de les confronter aux quelques observations.

La gestion de l'information géophysique n'est pas sans conséquence sur la méthode par sondages. Si on ne tient pas compte des résultats de la géophysique, on ne risque pas d'améliorer la caractérisation des structures et certaines anomalies resteront inexplicées ce qui dévalue la reconnaissance du terrain.

4.3.3 Peut-on diminuer le nombre de tranchées à l'aide de la géophysique ?

Cette question n'est pas posée pour engager une polémique, mais pour clarifier une situation couramment évoquée et qui porte largement préjudice à la mise en œuvre de la prospection géophysique en archéologie préventive. On a présenté ci-dessus trois cas relatifs aux résultats du diagnostic. Dans le premier, la géophysique, non opérante, n'influe pas sur la méthode classique du diagnostic. Dans le deuxième, on a réalisé une interprétation conjointe avec les résultats des sondages mécaniques : mais pour que la comparaison soit valable on n'a pas réduit le nombre de tranchées. Dans le troisième, lorsque les données géophysiques sont positives on peut envisager une diminution du nombre de tranchée sur les secteurs positifs pour la **préservation** des vestiges cartographiés. Mais il faut juger si sur les secteurs apparaissant comme négatifs en géophysique, ils existent des vestiges. Il reste sans doute plus intéressant de mieux répartir les tranchées sur les secteurs plutôt que de réduire le pourcentage total d'ouverture. Quelle que soit la solution adoptée, on doit constater que la diminution de la surface ouverte entraîne une perte de qualité dans l'évaluation archéologique, mais que la conservation des vestiges pour la fouille apporte une plus-value non négligeable.

Dans la pratique, sur les terrains étudiés, les archéologues ont tendance à se concentrer sur les secteurs positifs, démarche peu cohérente mais état de fait. Il faudra encore beaucoup progresser pour pouvoir estimer la nature des anomalies tout en conservant les vestiges.

Il faut à budget égal tenter de juger pour chaque site, et en amont de l'ouverture, si les résultats géophysiques sont compatibles avec une réduction du taux d'ouverture et estimer à combien on peut réduire ce pourcentage en fonction des résultats obtenus. La géophysique doit donc être plutôt considérée comme une analyse préalable venant préciser l'étude que comme une méthode à mettre en œuvre pour réduire le nombre de tranchées.

4.3.4 Comment faire intervenir la géophysique dans le cadre du diagnostic ?

Il n'est pas envisageable de réaliser des prospections au cours du diagnostic car les terrains sont fortement perturbés. L'omniprésence de tranchées étroites et de déblais ne permet de cartographier que des surfaces restreintes.

De plus, l'intérêt de la géophysique est d'autant plus limité que la prospection prend place après l'ouverture par tranchées. Aucune réflexion ne peut alors être menée sur la stratégie d'implantation des tranchées. Très souvent les cartes géophysiques révèlent pourtant des incohérences entre les observations de terrains et les résultats de prospections (Bernolsheim, Sainte-Croix-en-Plaine).

La prospection géophysique sur un site déjà reconnu par sondage ne présente pas beaucoup d'intérêt : la réalisation des tranchées qui entraîne le brassage du sol a un impact non négligeable sur la qualité des cartes géophysiques alors que la prospection avant sondage permet de s'affranchir de ces perturbations même si cela implique de plus grandes incertitudes dans l'adéquation des méthodes mises en œuvres.

Si les tranchées sont rebouchées, les perturbations géophysiques sont généralement limitées aux sondages dont l'impact est acceptable puisqu'à part quelques incohérences spatiales dans l'analyse des données, les cartes géophysiques vont pouvoir être interprétées en confrontant les résultats avec les observations du diagnostic. Lorsque les tranchées sont peu profondes, l'ouverture peut avoir un impact très faible sur les structures. En général, si le décapage ne concerne que le niveau de terre végétale (où les niveaux sont généralement assez magnétiques) l'influence est minime : il est beaucoup plus important lorsque les tranchées sont profondes, même lorsque les terres sont triées. C'est le cas pour certains secteurs de Bernolsheim où les sondages relativement profonds ont entraîné un brassage important des niveaux superficiels magnétiques. Cette observation a été faite sur d'autres sites, notamment dans les loess, où le mélange des niveaux profonds moins magnétique avec les couches superficielles beaucoup plus magnétiques ont provoqué des perturbations, jusqu'à empêcher la mesure d'anomalie de faible amplitude.

La prospection réalisée sur des terrains diagnostiqués, en amont de la fouille après définition de la prescription, peut servir à documenter le site : les anomalies sont comptabilisées comme indices. Enfin, ces prospections sont souvent réalisées sur des sols en jachère ou abandonnés après le diagnostic, sur lesquels le brassage des terres a favorisé la formation d'une végétation buissonnante peu adaptée à la réalisation de prospection géophysique. Il faut donc privilégier une intervention sur un terrain encore vierge aux sols homogènes, structurés et uniquement perturbés par les aménagements archéologiques.

4.3.5 Comment prévoir l'efficacité d'une prospection ?

L'efficacité de la prospection géophysique repose sur les pré-acquis de l'objet recherché. Par définition, ce n'est donc pas une méthode qui peut être utilisée seule pour la détection d'objets dont on ignore l'existence et les caractéristiques. Cependant, elle est d'un apport significatif pour le diagnostic archéologique surtout quand elle est mise en œuvre avant l'ouverture par tranchées alors que la connaissance du terrain est quasiment nulle. Il convient de privilégier la mise en œuvre de plusieurs méthodes et, si ce n'est pas envisageable, de préciser le contexte pour choisir les plus pertinentes.

Le contexte archéologique, nous renseigne sur le type de vestiges qu'il est possible de rencontrer sur une zone d'étude. Sur le diagnostic d'Ensisheim, les opérations plus anciennes laissaient présager l'existence de structures en creux plutôt que de structures empierrées, notamment par la proximité d'une nécropole mérovingienne. Sur l'étude de Steinbourg les résultats géophysiques ont surtout porté sur la *villa* et ne se sont pas concentrés sur la partie ouest où des vestiges présentaient des contrastes de propriétés magnétiques avec l'encaissant. Une étude plus large et moins axée sur le bâtiment antique aurait sans doute permis de détecter les vestiges liées à l'activité artisanale.

Les études ont révélé l'effet prédominant de la nature géologique du terrain qui, en favorisant ou non les contrastes, peut rendre plus efficace certaines méthodes qu'il conviendra alors de choisir sciemment. La reconnaissance de la nature géologique n'est pas évidente. On dispose d'un ensemble d'informations, cartes géologiques, cartes des sols, etc., pour appréhender les types de sols en amont de l'étude mais leur précision spatiale est rarement assez bonne, et les données assez précises pour évaluer l'efficacité de la méthode envisagée. En plaine par exemple, la carte géologique indique un recouvrement d'alluvions holocènes. La carte des sols d'Alsace précise cette information car la connaissance du sol aide à évaluer la nature des niveaux sous-jacents. Cependant, cette carte ne renseigne que les niveaux les plus superficiels et présente des lacunes de précision spatiale mais aussi de reconnaissance en profondeur (recouvrement limoneux argileux ou graveleux) et ignore d'autres facteurs qui peuvent aussi rentrer en compte.

On peut estimer le contexte géophysique à partir de plusieurs types de mesures, dont l'association facilitera la réussite de la prospection. Afin d'appréhender le contexte électrique, on peut réaliser un sondage électrique ce qui rend compte de la distribution verticale de la résistivité ainsi que de la résistivité apparente en surface pour un écartement donné. Les différences entre le terrain et le modèle n'empêchent pas l'utilisation de ces sondages car c'est la réponse physique du sol qui permet de juger de l'efficacité des méthodes. Le sondage électrique renseigne également l'épaisseur du recouvrement. Les niveaux récents sont très souvent fortement différenciés des substrats. Ces valeurs de résistivité apparentes permettent de préciser la capacité de la géophysique à détecter des vestiges conducteurs (fossés, etc.) ou résistants (murs, etc.). De même, elle fournit des renseignements qui permettront de juger l'efficacité des appareils électromagnétiques (haute ou basse fréquence) où la

résistivité joue un rôle important. Les appareils EM basse fréquence favorisent la détection des structures conductrices alors que pour les appareils EM haute fréquence la propagation des ondes est limité par ces mêmes milieux. Ce sondage de résistivité électrique nous renseigne aussi sur la fraction argileuse qui joue un rôle important dans l'expression des propriétés magnétiques. Les milieux très argileux défavorables à la mise en œuvre de la méthode magnétique ou très sableux (c'est-à-dire des milieux très conducteurs ou très résistants) peuvent aussi être identifiés.

Un forage à la tarière et une diagraphie (avec le MS2-H par exemple) peuvent renseigner la susceptibilité de ces niveaux de sols. Si ces valeurs de susceptibilité sont très faibles, les contrastes (autres que ceux dus à la chauffe de sédiments) entre comblement et encaissant seront moindres. La relation entre les valeurs de susceptibilité de l'encaissant et les contrastes des structures n'est pas aussi évident que pour la résistivité mais elles permettent d'estimer les valeurs régionales. La détection est avant tout dépendante du type de vestiges (qui détermine le contraste).

Les sondages électriques peuvent être associés à une cartographie large maille dont la résolution est bien adaptée aux variations sédimentaires. L'efficacité de l'outil géophysique s'en trouve amplifiée.

Les différentes mesures géophysiques sur le contexte sédimentaire précisent la méthode à employer et peuvent servir de guide lors de la reconnaissance du terrain par sondages systématiques. La connaissance de l'épaisseur du recouvrement et de la variabilité géologique est précieuse pour estimer les moyens nécessaires à l'ouverture mais aussi pour donner des indications sur la relation entre l'occupation humaine et les dynamiques sédimentaires. Cette phase préliminaire de mesures et d'analyses géophysiques est une démarche supplémentaire à la prospection archéologique proprement dite où le protocole est adapté à la caractérisation des témoins anthropiques. Sa réalisation évite un investissement en temps et en moyen conséquent sur des terrains inappropriés et peut se traduire par le choix d'une méthode adaptée lorsqu'il n'est pas envisageable d'en utiliser plusieurs.

4.3.6 Comment intégrer efficacement les résultats de prospection ?

La prospection géophysique est considérée dans la démarche archéologique du diagnostic comme une information supplémentaire. Comme pour toute intervention son intégration n'a de sens que si elle utilisée pour l'exploitation finale des données et non pas uniquement en servant d'élément préliminaire pour orienter le mode d'ouverture par tranchées mis en œuvre sur le terrain.

La présentation des anomalies doit être étroitement liée à la description des structures et l'association se fait alors d'elle-même. Elle s'insère au même titre que les autres analyses archéométriques aux résultats finaux. Comme pour toute étude, l'association des différentes informations demande un temps de traitement plus long mais enrichit la compréhension du site. Il faut donc privilégier une approche interdisciplinaire incontournable en archéologie. L'addition sommaire

des deux types d'informations apporte peu d'éléments aux résultats archéologiques. La coopération entre prestataire privé de prospection géophysique et opérateur archéologique est de fait souvent insuffisante, car elle demande un suivi continu des projets trop coûteux.

L'approche par sondages systématiques et l'approche géophysique tendent vers un seul et même objectif. L'opposition des méthodes n'est pas fondée puisque chaque outil a des avantages et des limites qui lui sont propres. La dissociation actuelle est le fait de commanditaires multiples qui cherchent à travers chaque méthode leurs propres intérêts, en évitant tout recours aux autres méthodes. Cette opposition a toujours porté préjudice à la mise en œuvre de la prospection géophysique.

La détection de fantômes par la géophysique nécessite de déterminer la valeur de ces structures archéologiques, c'est-à-dire s'ils relèvent d'éléments du patrimoine ou si malgré leur expression physique il n'y a pas à les considérer comme des éléments tangibles. Il faudra à l'avenir décider de l'impact de cette information. Si elle est jugée utile alors elle doit figurer dans le cahier des charges de la fouille. Une réflexion doit être menée sur la façon d'intégrer l'information géophysique pour l'élaboration de la prescription. Or les différences observées entre images géophysiques et réalités de terrain (exhaustivité des structures, fantômes magnétiques, etc.) montrent la nécessité d'adaptations.

4.4 La prospection géophysique dans la phase du diagnostic... un premier bilan

Pour le diagnostic il faut considérer la prospection géophysique comme un outil de caractérisation. Son usage en tant qu'outil de reconnaissance connaît certes des limites, que l'on peut évaluer par une approche théorique, causées par la nature des structures et la modification physique du sous-sol qu'elles induisent ainsi que par leurs situations (sédimentation, recouvrement). Elle ne peut donc pas à elle seule détecter l'intégralité des vestiges et elle ne le revendique pas. Par contre, on peut en user comme d'un outil d'analyse qui repousse les limites du diagnostic archéologique traditionnel en précisant très souvent les besoins nécessaires à la fouille des vestiges (fig. 176).

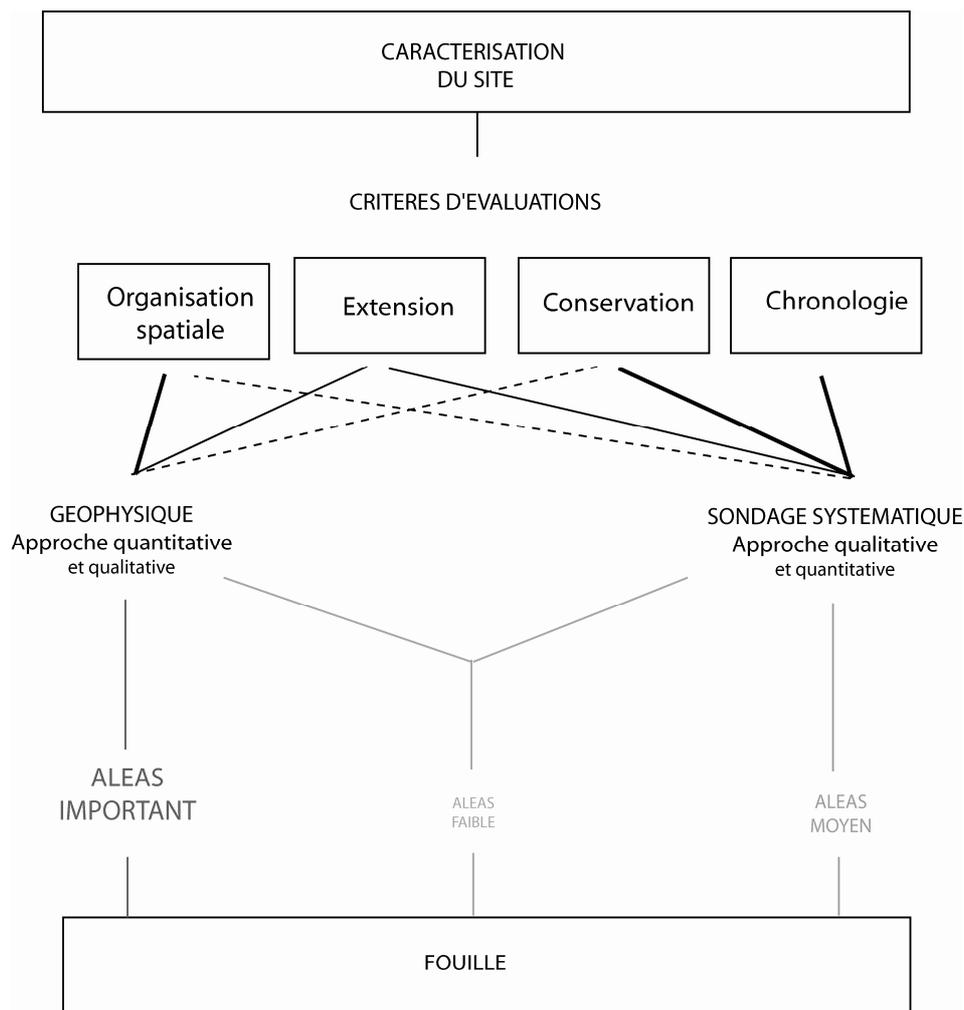


Figure 176 : Schéma récapitulatif de l'intérêt d'associer les tranchées de sondages systématiques à la prospection géophysique dans le but de réduire l'aléa relatif à des découvertes fortuites en cours de fouille. Chaque méthode comble des lacunes de l'autre afin d'optimiser le protocole et la méthode d'investigation.

Les outils géophysiques ont une limite évidente, purement physique, qui sera repoussée par le progrès technique mais qui ne peut être remise en cause. Ils ne peuvent pas détecter certaines structures de petites tailles ou trop profondes ou sans contraste. Il existe également d'autres limites pratiques. Les deux premières sont contextuelles : les résultats sont dépendants du contexte géologique et géographique actuel qui peut - par le biais de bruits sur les données - atténuer fortement les capacités de détection. La troisième est la qualité de l'interprétation des résultats archéologiques. Les multiples expériences de prospections géophysiques dans le cadre de l'archéologie de sauvetage, puis préventives, ont souvent cruellement manqué d'interprétations, non pas géophysiques - l'opérateur est toujours en mesure de donner des explications sur la forme et l'origine des anomalies - mais plutôt archéologiques, dans le sens où seules les structures les plus importantes sont interprétées donnant à penser que l'outil géophysique n'est capable de détecter que ces dernières alors que c'est au contraire pour les anomalies difficiles à identifier que la qualité de l'interprétation importe.

CONCLUSION

L'analyse critique des prospections réalisées au cours de ce travail montre que la prospection géophysique peut très bien s'intégrer dans le cadre de l'archéologie préventive même si son usage est contraint par des directives législatives, des habitudes et des protocoles, qui ont été élaborés sans tenir compte de cet outil. Nous avons mis en œuvre l'outil géophysique dans plusieurs cas de figure, sur différents sites et dans différents contextes. L'objectif premier était de répondre à la problématique posée dans le cadre de l'étude : estimer l'apport de l'information géophysique aux résultats archéologiques en contexte préventif. Sa finalité répond bien à plusieurs attentes de l'archéologie préventive : analyse des structures, reconnaissance des vestiges, caractérisation des occupations humaines (extension, densité).

1 Faut-il changer les pratiques actuelles : le problème des fantômes ?

La géophysique a été mise en œuvre sur la surface décapée afin de reconnaître des structures fantômes. Ces problèmes de lecture peut-être communs à plusieurs sites, ne sont néanmoins pas systématiques. Il serait donc nécessaire d'estimer l'intérêt de mettre en œuvre des analyses géophysiques en amont de l'opération. L'existence de fantômes pourrait être rapprochée des problèmes de reconnaissance dans la région de structures fines d'habitats pour certaines périodes alors que plusieurs sites révèlent de nombreuses fosses et silos (Croutsch 2008). Si des structures d'habitats sont associées à ces fosses alors la mise en œuvre d'outils géophysiques permettra peut-être de les mettre au jour. La prise en compte de ces phénomènes impliquent aussi de revoir les pratiques associées au décapage. Le seul indicateur visuel ne permettrait alors plus de juger de la profondeur du décapage ou même de la reconnaissance en plan des structures. Ces problèmes sont exacerbés lorsque l'on s'intéresse aux niveaux peu visibles. La sauvegarde du patrimoine ne relève plus de destructions monumentales mais de destructions paradoxalement invisibles. Cette question pose donc le problème de la valeur que l'on donne aux fantômes géophysiques. Ces traces font parties, tout comme les tessons de céramiques, des fossés, ou les murs de *villae* antiques, de notre patrimoine. Néanmoins, mobiliser des moyens et sensibiliser les acteurs de l'aménagement relèvent alors d'une toute autre gageur. Ces phénomènes posent donc aujourd'hui un véritable problème méthodologique.

2 Contrainte et pratique de la géophysique

L'utilisation de la géophysique en archéologie préventive entraîne des problèmes. Bien que d'un intérêt avéré, les prospections hors emprise mettent en évidence le problème du financement de l'opération de prospection : elles n'ont pas à être portées par l'aménageur si on se réfère au principe du pollueur-payeur. L'étude traiterait alors de la compréhension du site et non plus de l'étude des vestiges menacés. Pourtant, la mise en perspective spatiale peut donner au site une cohérence territoriale et,

dans le cas des emprises restreintes, aider à l'identification des sites : une étude géophysique produisant des données complémentaires précieuses pourrait alors faire partie du projet scientifique. Le principe du pollueur-payeur ne serait plus limité aux aspects matériels des vestiges mais à la perte des connaissances qui y sont associées et surtout il peut exister des cas où la connaissance hors emprise est indispensable à toute prise de décision. Cette utilisation pointe un problème propre à l'archéologie préventive qui est celle de la surface étudiée par rapport à l'étendu du site et de la place qu'on donne aux interactions entre sites dans la compréhension générale de l'archéologie. C'est l'apport de l'approche spatiale à la problématique archéologique qui doit donc être évalué, l'usage d'outil géophysique en découlera automatiquement.

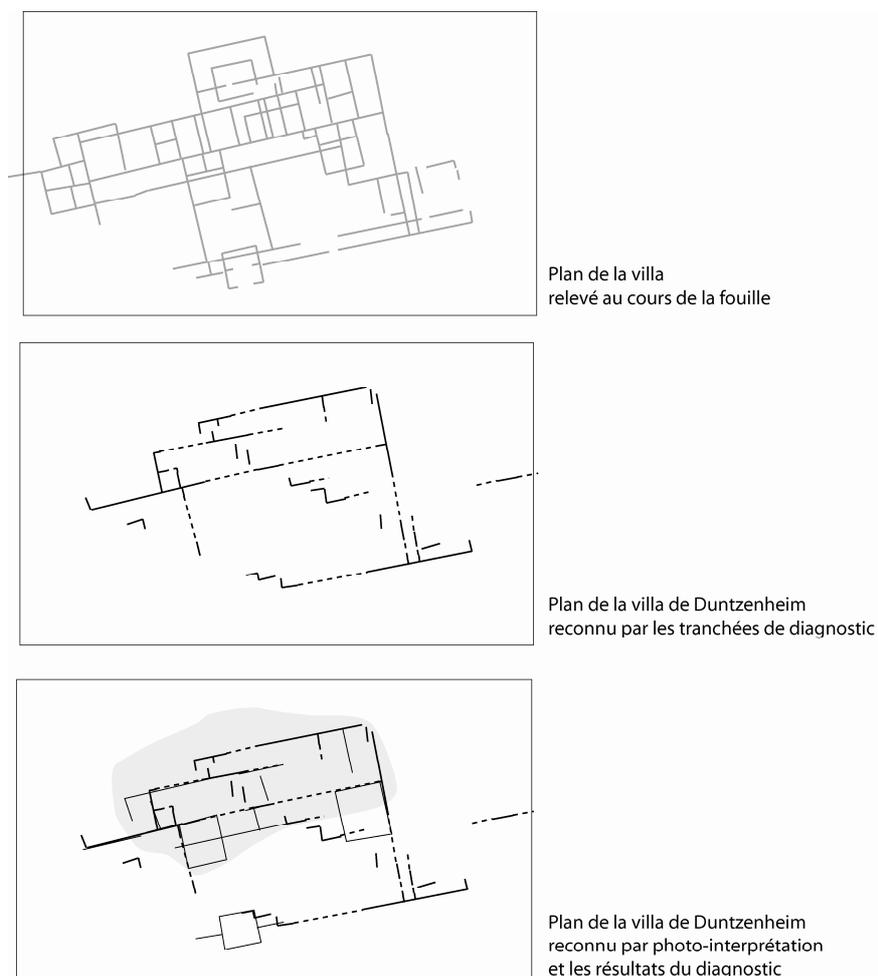


Figure 177 : Comparaison du plan de la villa fouillée, du plan suggéré par les résultats du diagnostic (d'après Schneikert 2007) et du plan où résultats du diagnostic et photo-interprétation sont associées. Alors que les sondages ont permis de repérer des murs, les photographies aériennes révèlent des ensembles structurés.

Pour le diagnostic, les contraintes sont d'avantage d'ordre pratique. En amont de l'opération, moment idéal pour acquérir des données géophysiques, il n'existe souvent aucun présupposé sur la présence de vestiges (autres que de lacunaires informations fournies par la carte archéologique). Cette

méconnaissance engendre des contraintes, d'une part sur la façon de mettre en œuvre les méthodes, mais aussi sur l'efficacité des celles choisies. Par commodité, on a tendance, comme en Angleterre (Jordan 2010), à réaliser des prospections magnétiques qui s'avèrent globalement les plus efficaces sur le territoire alsacien. Elles sont pourtant inadaptées à certains contextes, alors que d'autres méthodes pourraient reconnaître les vestiges, ou quand ces derniers ne s'y prêtent pas, le contexte sédimentaire. L'intégration de données de prospections (toutes méthodes) accumulées au cours des 30 dernières années, aux résultats par sondages systématiques ne se fait que très rarement (Georgeon 1999). Elle aurait pu, dans certains cas, éviter des erreurs quant à l'interprétation et l'extrapolation spatiale des vestiges (fig. 177), à la condition d'être envisagée de manière méthodique. Les difficultés de gestion de l'information existante sont dues en partie au décalage entre l'état de la carte archéologique - qui ne fait que sommairement état d'indices d'occupation - et la synthèse et l'aboutissement de ces prospections. Il semble aujourd'hui évident que l'intégration systématique d'une information de prospection, précise et géolocalisée, pourrait servir de base à une caractérisation plus fine des vestiges.

3 De la sauvegarde par l'étude à la gestion des sites

Le terme « préventif » semble plus caractériser la gestion du projet d'aménagement que la gestion des vestiges : les dispositions, qui dictent la fouille la plus exhaustive possible et dans les meilleures conditions, sont également conçues pour en minimiser l'impact sur le projet d'aménagement. L'aspect préventif de l'archéologie concerne donc essentiellement le montage du projet d'aménagement et la définition des conditions d'étude. L'archéologie préventive est alors définie par l'action d'étudier le patrimoine qui va être perdu et non pas de le gérer.

L'apport de l'archéologie préventive à l'archéologie globale est néanmoins évident : elle a rendue possible l'étude de nombreux sites jusqu'alors insoupçonnés et ce sont les données récoltées ces 20 dernières années qui révèlent aujourd'hui les importants vides de nos connaissances et les incohérences des modèles archéologiques et offre l'occasion de repenser la gestion du patrimoine archéologique. On ne peut pas assimiler l'archéologie préventive à une gestion du patrimoine archéologique, qui n'a de but que le sauvetage par l'étude. Or, les outils de prospections comme la prospection géophysique sont susceptible en complément à d'autres méthodes non intrusives (plan ancien, prospection pédestre, aérienne, morphologie) de fournir des cartes de sites et de leur réseau. Ces derniers pourraient être pris en compte dans les plans locaux d'urbanisme, avec la délimitation de zones de risques archéologiques par la cartographie des sites.

De plus la carte archéologique actuelle n'est prise en compte qu'à titre indicatif et n'a que peu d'impact dans la définition des lignes directrices relatives à l'aménagement du territoire (CPCAF 2000). Son état actuel ne permet pas d'envisager beaucoup plus de réponses que celle déjà fournies. Un état plus avancé permettrait sans doute de préconiser une gestion du patrimoine archéologique *in*

situ tout en précisant les zones de saisines déjà définies. A Sainte-Croix-en-Plaine, la politique d'aménagement se concentre paradoxalement sur les indices de sites révélés par la prospection aérienne et géophysique, interprétés en partie grâce aux observations de fouille et de diagnostic. L'intégration d'une carte archéologique précise de ces indices dans le plan local d'urbanisme éviterait les problèmes récurrents d'abandon ou de retard des projets de développement.

On pourrait gérer les sites archéologiques comme les monuments historiques, dont la conservation nécessite des mesures en amont de l'aménagement. L'objectif final serait donc d'intégrer le plus tôt possible dans la définition des politiques d'aménagement, les informations fournies par une carte archéologique précise (dans un premier temps à l'échelle des aménagements envisagés) sur laquelle les informations apportées par chaque méthode de prospection seraient pondérées en fonction de son efficacité. La carte archéologique serait alors un document intégrant les données sur les formations superficielles, les systèmes géomorphologiques affinant la connaissance des processus taphonomiques (Costa 2005) ainsi que l'efficacité des outils utilisés pris en compte pour fournir des zonages d'aléas archéologique et préserver les sites majeurs, où pour lesquels le coût de la fouille ne pourrait être supporté par le budget global de l'aménagement (Martin 1994).

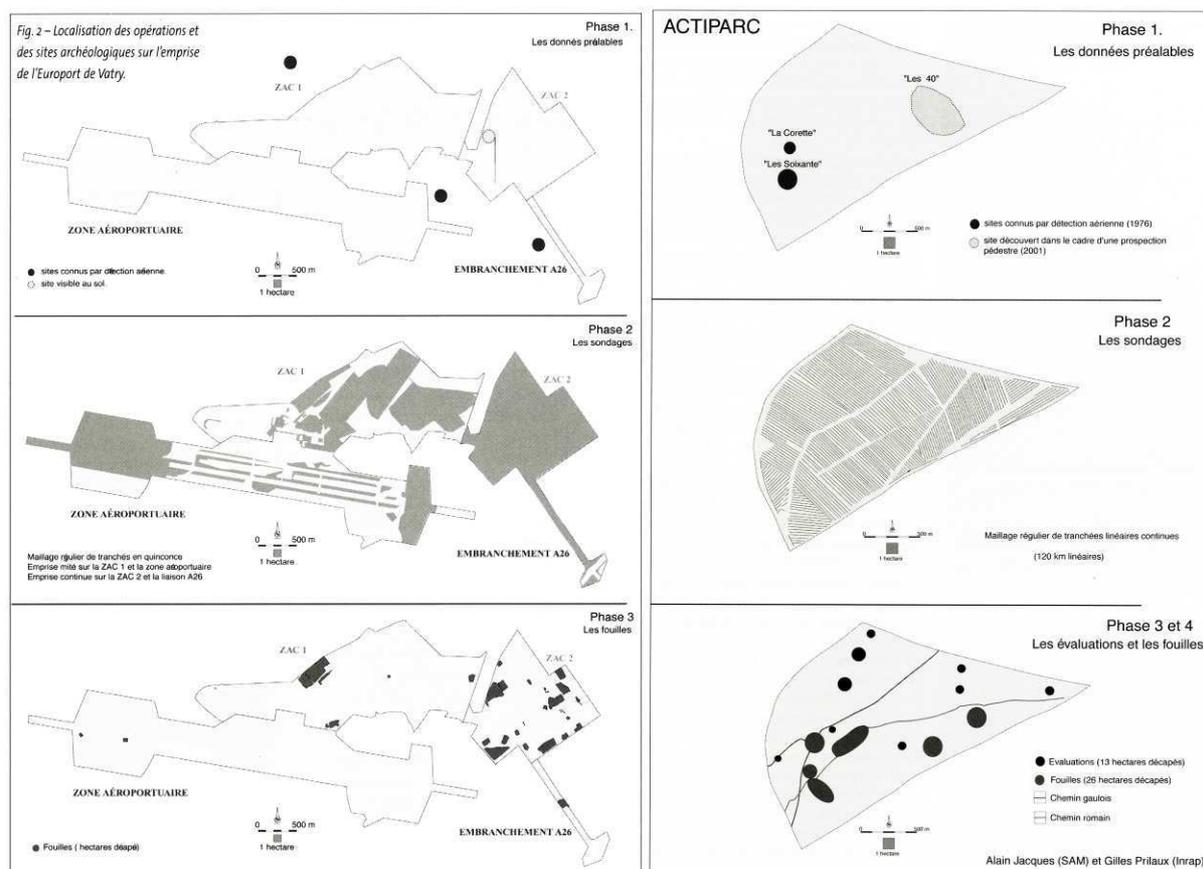


Figure 178 : Comparaison entre l'apport des prospections et les résultats des sondages de diagnostic et de fouille. Les plans montrent clairement que le diagnostic a permis de repérer de nombreux vestiges non détectés par les études préalables (prospections pédestres et aériennes). Ces deux méthodes ne répondent pas aux mêmes objectifs (à droite Achard-Corompt et Riquier 2006, Jacques et Prilaux 2006)

L'utilisation de méthodes de prospections et de cartographie risque cependant à long terme d'entraîner des dérives administratives qu'il faudrait impérativement maîtriser (confusion entre archéologie préventive et carte archéologique (fig. 178), reconnaissance des limites des méthodes de prospection, confusion des objectifs : gestion et sauvetage par l'étude). Le contrôle le plus efficace pourrait être d'intégrer dans la démarche archéologique générale, au même titre que l'archéologie préventive, la gestion du patrimoine archéologique *in situ*.

Les nouvelles pratiques permettraient d'une part la sauvegarde par l'étude des vestiges archéologiques détruits, et d'autre part la gestion des sites reconnus. La gestion du patrimoine serait alors établie sur la base de la reconnaissance non-intrusive. Il est primordial de contrôler l'acquisition, le traitement et l'interprétation conjointe de ces données de prospections avec les résultats des opérations de diagnostics et de fouilles, avec des équipes de prospections compétentes et intégrées dans des services archéologiques publiques (Tabbagh 1999) et au service des décideurs publics de l'aménagement du territoire, tout en restant dépendant des contraintes politiques.

4 Accroître l'efficacité des diagnostics en précisant l'analyse archéologique

La connaissance de l'existence de certains sites et des formations géologiques superficielles, permettrait de reconsidérer les pratiques relatives au diagnostic. L'investigation par sondages systématiques affinerait la caractérisation et la reconnaissance sommaire du site par les outils de prospections, et permettrait de définir les moyens nécessaires pour la fouille en diminuant les aléas relatifs aux découvertes archéologiques non prévisibles. Les données géophysiques, par la caractérisation de structures ou niveaux fantômes, pourraient servir à élargir le spectre des analyses et des méthodes d'investigation classiques du site : datation du matériel, analyse environnementale, etc.

L'information géophysique associée à des structures parfois invisibles, permettrait d'améliorer la mise en œuvre du décapage pour préciser la nature de phénomènes invisibles et faire la distinction entre les situations stratigraphiques et planimétriques des structures et de leur niveau d'apparition. Ces différences n'étaient jusqu'à ce jour que difficilement identifiables par les sondages et l'apparition de structures en profondeur souvent attribuée à des phénomènes d'érosion. Il serait alors possible de distinguer ces processus des simples problèmes de lectures.

L'intégration de pré-acquis dans la phase de diagnostic préciserait la reconnaissance de certains vestiges, en accédant directement au niveau d'occupation archéologique et en gérant l'impact des tranchées sur leur conservation pour la fouille, en se focalisant sur les zones de vides afin de déterminer la raison de l'absence d'indices de sites (recouvrement, taille des structures, etc.). En intégrant les observations sur les dynamiques sédimentaires et l'occupation humaine on pourrait, après chaque opération, affiner la carte archéologique, à la condition d'y intégrer de façon précise et

objective les résultats, et préciser à partir de ces interprétations conjointes l'élaboration des schémas d'occupation spatiale.

Cette carte du patrimoine, ne saurait être exhaustive, car l'intégralité des vestiges ne peut être reconnue par le biais de prospections. Ce rôle incombe aux sondages systématiques (Blouet 1994). De plus, même si l'existence des sites est avérée, de nombreuses imprécisions demeurent : période d'occupation, fonctionnement, etc. Le sondage systématique reste donc la seule manière de reconnaître et caractériser au mieux les vestiges.

La comparaison des résultats des sondages systématiques et des prospections géophysiques affinerait les analyses, la géophysique permettant de dépasser la limite statistique et spatiale des sondages. La comparaison avec les résultats des sondages caractériserait pour chaque entité géologique et géographique les limites des méthodes (profondeur des structures, taille, nature du comblement, etc.) afin de pondérer alors à une large échelle l'efficacité de la géophysique. Les limites des deux approches étant bien définies, il serait alors possible pour chaque secteur cartographié d'optimiser les futurs diagnostics.

Les études de diagnostic par sondages systématiques présentent un niveau de qualité très variable (protocoles de mesures, traitements des résultats, interprétations des données). Alors que les résultats archéologiques sont aujourd'hui rigoureusement contrôlés, la mise en œuvre de prospections géophysiques ou d'autres méthodes comme le LIDAR, nécessiterait au sein des services des nouvelles connaissances techniques qui permettraient de juger de la qualité de l'interprétation ou, entre autres, des traitements effectués (Tabbagh 1999). Ces problèmes bien connus par la communauté britannique sont entraînés par la multiplication des opérateurs privés qui génère des données, issues d'opérations dont la qualité peut se révéler inégale, tant pour la géophysique que pour la fouille. Le service national britannique a tenté à plusieurs reprises de gérer ce problème en proposant des guides de bonne conduite (David *et al.* 2008). Ce service national a à ce jour beaucoup de difficultés à contrôler l'ensemble des études réalisées et n'a que peu de poids sur la diffusion des résultats. La variabilité des contextes, le type de structures rencontrées et les protocoles géophysiques ne sont pas systématiquement adaptés (avec l'utilisation quasi-systématique de la méthode magnétique) (Bonsall *et al.* 2011). Un taux d'ouverture de 2 %, comme celui généralement observé sur les évaluations au Royaume-Uni, ne peut alors pas reconnaître systématiquement les sites même en intégrant des données de prospections géophysiques (Laroche 1998). La reconnaissance par tranchée avec un taux d'ouverture minimal est pourtant primordiale et permet d'éviter des situations désastreuses pour la sauvegarde du patrimoine.

5 Archéologie des sites, archéologie dans la longue durée : modèle et prévention

Les données archéologiques fournies par les différentes méthodes de prospections peuvent permettre de repenser l'archéologie dans la longue durée. Non plus comme une occupation figée entre l'installation et l'abandon du site, perception induite par son étude, mais comme une archéologie, en mouvement, allant des périodes les plus anciennes avec des marqueurs essentiellement environnementaux à des périodes récentes encore inscrites dans les paysages (Robert 2000). Pour celles-ci, l'intégration des résultats des cartes LiDAR et des cartes anciennes, est primordiale, non plus comme indicateur de sites mais comme marqueur des évolutions topographiques des paysages. La démarche est similaire à celle traitant de la morphologie du paysage où l'on s'intéresse tant au forme qu'aux marqueurs fossiles des sites (Chouquer 2008). L'étude des sites s'intègre alors dans un territoire en mouvement, révélé par les prospections.

Les sites archéologiques font l'objet d'incessantes phases d'érosion (naturelle ou agricole) qui vont jusqu'à provoquer la disparition de vestiges. Or, les résultats des prospections pédestres sont issus de cette érosion. La méthode peut donc être considérée comme un indicateur de l'érosion des sols. Les niveaux de conservation et d'érosion des sites peuvent également être révélés par les données LiDAR ou géophysiques (Quérien *et al.* 2009).

A partir des résultats des prospections, on pourrait déterminer l'impact de l'homme sur des secteurs jugés peu sensibles jusqu'à aujourd'hui. Il est pourtant admis qu'un tiers des destructions archéologiques est le fait de l'érosion progressive et lente, moins spectaculaire que l'aménagement.

Ce patrimoine menacé profiterait des mêmes protocoles que ceux mis en place pour l'archéologie préventive. Dans le cas de Duntzenheim, l'aménagement de la LGV a entraîné la création d'une zone tampon à l'abri de nouvelles constructions, induite par la proximité de la ligne ferroviaire. Le site reste néanmoins sous la menace de la pression et de l'érosion agricole. Alors que ces vestiges sont en péril, aucune mesure n'est actuellement prise pour les préserver même par l'étude, car ils ne sont pas considérés dans la veille archéologique établie par le service régional d'archéologie. Les prospections définiraient donc des secteurs soumis à de sévères processus d'érosion par l'élaboration de cartes synthétisant les données sur l'état des sols. Des ramassages de surface et des cartes de prospection précises pourraient dans un premier temps constituer un corpus de données, à l'heure où aucune solution alternative n'est envisagée, renouant ainsi en partie avec les anciennes préoccupations de l'archéologie préventive.

Les cartes du patrimoine archéologique *in situ* feraient prendre conscience des destructions liées d'une part, à l'aménagement du territoire et, d'autre part, aux diverses activités humaines qui entraînent des modifications sur les niveaux superficiels des sols (agriculture, etc.). L'impact de ces actions justifierait alors l'intégration des données patrimoniales dans l'élaboration des plans locaux d'urbanisme et de politique agricole (Lavigne 2011).

Les phases de prospections systématiques multi-méthodes n'ont de sens que si elles sont intégrées dans la définition des plans d'urbanisme locaux. La délimitation de zones sensibles, de vestiges avérés et de zones sans indices allégerait le « risque archéologique » (qui restera toujours existant).

6 L'intérêt dans le cadre de la gestion des plans locaux d'urbanisme

Les prospections documenteraient des cartes archéologiques qui intégreraient les données sur l'occupation des sols, les risques de la pression humaine, la reconnaissance de sites archéologiques, la variabilité des sols et les zones à forts risques de destructions par l'aménagement. Elles permettraient, sur le plan méthodologique de réviser les méthodes de détection des sites ainsi que certaines pratiques de l'archéologie préventive, et d'optimiser l'étude des sites détruits et sur le plan pratique de réviser les plans locaux d'urbanisme pour minimiser la destruction des sites et l'impact financier de l'activité archéologique sur les projets d'aménagement. Ces résultats seraient intégrés dans les politiques d'aménagement. Les liens entre opérateurs et aménageurs sont effectivement de plus en plus forts ce qui prouve qu'il est nécessaire aujourd'hui d'intégrer à l'aménagement et l'urbanisme les contraintes archéologiques. En effet pris le plus en amont possible, la contrainte archéologique ne paraît plus subie mais gérée.

La démarche actuelle consiste à soumettre le projet d'aménagement au Service Régional de l'Archéologie, s'il n'a pas fait l'objet d'un diagnostic anticipé, qui juge de l'opportunité de réaliser une prescription archéologique. Une fois prescrit, le diagnostic a lieu, puis, si la présence de vestiges est attestée, la phase de fouille préserve le patrimoine archéologique par son étude (fig. 179). Le problème majeur associé à ce mode de fonctionnement est que l'existence de vestiges archéologiques est considérée comme un risque non prévisible, subi par l'aménageur, et généralement répercuté sur l'administrateur public ou l'investisseur foncier (maître d'ouvrage).

Le risque archéologique serait hiérarchisé en fonction des zones. L'aléa lié à la probabilité de découverte serait très faible sur les secteurs présentant des indices pertinents de vestiges et fort sur les secteurs pauvres en indices (car pouvant être associé aux limites des méthodes de prospections). La destruction de certains sites serait délibérée et prévue et le choix effectué dans le cadre du plan local d'urbanisme impliquerait d'en supporter le coût (principe universel du pollueur-payeur). La destruction du site en connaissance de cause implique que l'aménageur supporte le coût de la fouille (ce qui est déjà le cas).

La démarche proposée est donc une solution alternative qui préserverait l'intégrité de l'archéologie préventive et diminuerait le risque archéologique et par la même le coût et l'impact sur la viabilité des projets (fig. 180). Elle renforcerait la cohérence de la politique patrimoniale à l'échelle territoriale et augmenterait la qualité de l'étude archéologique. Cette carte archéologique précise

développée sur la base du modèle présenté ci-avant permettrait de réviser plusieurs des contraintes de l'archéologie préventive.

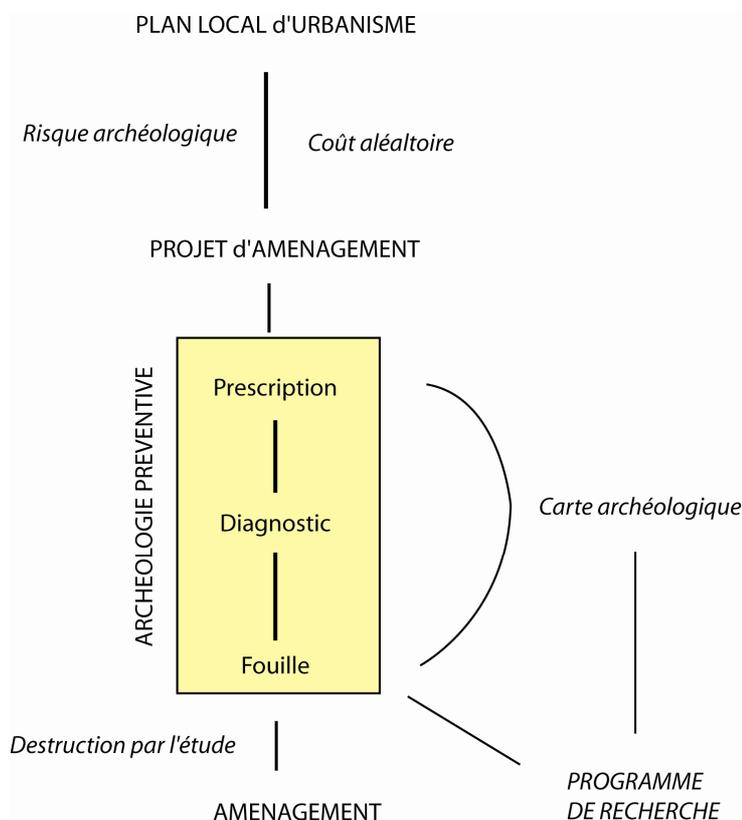


Figure 179 : Le schéma actuel. Le plan local d'urbanisme configure les projets. Celui-ci est soumis à prescription (suivant sa superficie ou son intérêt archéologique). Celle-ci entraîne alors la mise en œuvre de l'archéologie préventive qui vient réalimenter la carte archéologique. Dans ce schéma la principale limite est que la connaissance du patrimoine archéologique n'a aucune incidence sur les politiques d'aménagements. Il n'y a donc d'autres alternatives que la sauvegarde des sites par l'étude.

La carte archéologique, bien que toujours à compléter, recenserait de nombreux sites géoréférencés. Répertorier ces sites affinerait les modèles existant en réinjectant les résultats de ces nouvelles études. Il est important de préciser qu'une critique sur les données brutes doit toujours être envisagée afin que les modèles d'occupation erronés n'influent pas la révision de nouveaux modèles.

7 La conservation du patrimoine

La connaissance de secteurs présentant un fort risque archéologique (du fait de la reconnaissance de la variabilité des sols, de la géomorphologie et de la prospection à maille fine) permettrait de faire des choix quant à l'impact de l'aménagement sur le patrimoine. Ces études préalables permettraient de reconnaître certains sites tout en hiérarchisant l'information en fonction de la pertinence des indices : sites avérés, hypothétiques, présence de vestiges archéologiques probables, ainsi que des zones de vides, hiérarchisées en fonction des relations établis avec les dynamiques

sédimentaires, la pression de l'aménagement, etc. L'intérêt administratif de cette reconnaissance serait de pouvoir prévenir d'un risque archéologique si ce n'est quantifié, au moins qualitatif sur l'existence de vestiges. L'ensemble des zones serait évidemment soumis aux contraintes de l'archéologie préventive sans quoi la préservation du patrimoine en serait largement affectée. Il serait préjudiciable de ne pas conserver les avancées réalisées ces 20 dernières années tandis que les mesures relatives aux contraintes archéologiques tendent à s'assouplir pour les grands travaux (après la crise économique de 2008) (Demoule 2010). De même des exemples maladroits d'étude d'impact ont tendance à critiquer la méthode du sondage systématique, sans juger des objectifs et des attentes de l'archéologie préventive, et en ventant l'intérêt de la prospection alors que les objectifs sont différents (Campana et Dabas 2011).

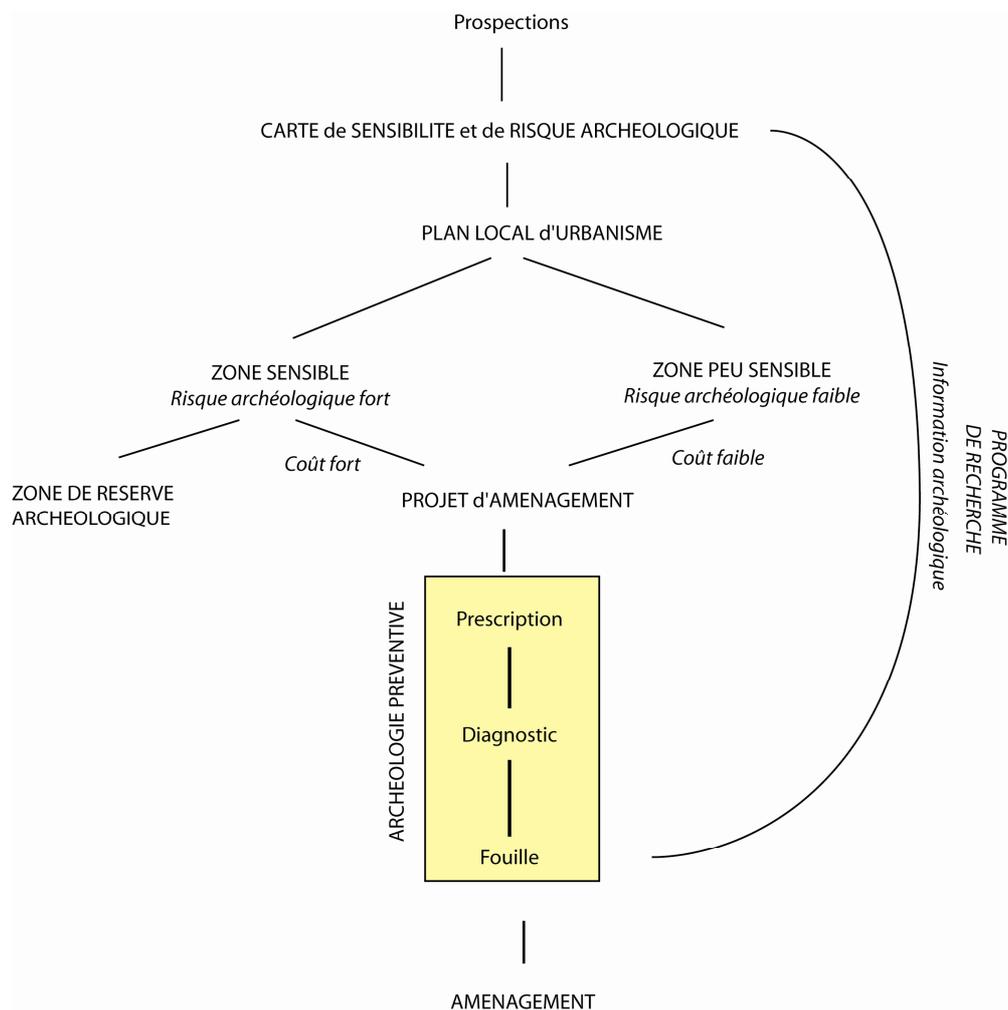


Figure 180 : Dans le nouveau schéma proposé la carte archéologique alors précisée est utilisée directement dans les politiques d'aménagements. Elle permet alors d'une part de contrôler l'aléa archéologique sans affecter la viabilité de ces projets, et d'autre part de préserver des sites archéologiques remarquables qui nécessiteraient des fouilles trop conséquentes pour être supportées par le projet d'aménagement. Les méthodes de prospections viennent alors alimenter une archéologie des grandes surfaces (toujours en milieu rural) et sont complémentaires à la technique traditionnelle de l'archéologie préventive qui reste de mise.

Finalement, cette carte du patrimoine n'a de sens que si elle est intégrée au plan local d'urbanisme et non pas au projet d'aménagement. Elle ne permet, à elle seule, qu'une gestion du patrimoine et non pas une étude exhaustive de l'impact de l'aménagement sur le patrimoine concerné par le projet. Cette confusion est à l'origine des dérives qui ont porté préjudice à la géophysique en archéologie préventive.

Ce protocole est proposé à titre indicatif et nécessiterait de très forts investissements au niveau territorial. Les atlas archéologiques déjà existants plutôt envisagés comme des cartes archéologiques très richement documentées pourraient servir d'exemple et d'étalon pour la définition de ces nouvelles cartes (moins ambitieuse à l'échelle du département mais plus précise par le nombre de méthodes de prospection mise en œuvre) (Costa 2005). Ces conclusions ne permettent pas de juger de l'efficacité de ce modèle ni de la possibilité de le mettre en œuvre, elles autorisent cependant de pointer certaines défaillances aujourd'hui préjudiciables pour notre patrimoine. Des modèles différents semblent possibles. Il faudrait alors trouver des solutions pour les mettre en œuvre en sus des pratiques déjà connues, probablement par la mise en place de zones tests où la gestion du patrimoine archéologique se verrait largement affinée.

8 Des solutions communes

Ces considérations, pratiques, de terrains, méthodologiques, théoriques, etc. ne sont envisageables que si l'on considère l'archéologie comme la somme de différentes approches interdisciplinaires. La pluridisciplinarité tant exaltée dans les années 90 n'est plus de mise. On l'a compris aujourd'hui l'archéologie a besoin d'un panel d'outil pour atteindre ces objectifs. Or la compilation de ces apports ne permet que de répondre à des problèmes déjà pressentis. Il faut aujourd'hui dépasser ces limites pour une archéologie interdisciplinaire où l'apport de chaque méthode vient enrichir tant les résultats que la problématique (Wattez et Jallot 2001). La mise en œuvre de la géophysique le souligne bien. Alors que l'approche pluridisciplinaire encore dominante dans le paysage de la recherche archéologique permet des cartographies de sites, l'approche interdisciplinaire telle quelle est proposée ici conduit à des problématiques communes, qui repousse les limites de pratiques et qui va jusqu'à proposer une réflexion sur l'objet d'étude. Evidemment qui dit interdisciplinaire dit collaboration, confrontation, etc. Ces dernières ne peuvent donc être que le fruit d'une interaction dont les protagonistes sont les acteurs de l'archéologie.

BIBLIOGRAPHIE

A

ACHARD-COROMPT N., RIQUIER V., Du désert à la grande plaine champenoise : archéologie préventive sous l'Euport Vatry, *Les Nouvelles de l'Archéologie*, 2006, n°104/105, p.13-16

AMATO M., BASSO B., CELANO G., BITELLA G., MORELL G., ROSSI R., In situ detection of three root distribution and biomass by multi-electrodes resistivity imaging, *Three Physiology*, 1998, vol.28, p.1441-1448

ANDRIEUX P., Les services territoriaux d'archéologie : un défi pour l'archéologie. *Positionnement des collectivités territoriales dans la chaîne de l'archéologie : vers une logique de coopération* Actes de la table ronde Strasbourg 21-22 octobre 2005, ed. par Matthieu FUCHS, 2006, p.28-33

ASPINALL A., GAFFNEY C., SCHMIDT A., *Magnetometry for Archaeologists*, Geophysical Methods for Archaeology, Altamira Press, Lanham, 2008, 208p.

B

BANERJEE S.K., Separation of local signals from the regional paleomonsoon record of the chinese loess plateau: a rock magnetic approach, *Geophysical Research Letter*, 1993, vol.20, n°9, p.843-846

BATS J.C., ROBERT S., MARMET E., Etude préalable, étude des formes du paysages et diagnostic archéologique : Déviation de la Rd915 à Marines, Santeuil et Frémécourt (Val d'Oise), Saint-Denis, SRA, 2001

BECK Y.L., PALMA-LOPEZ S., FERBER V., FAUCHARD C., FROUMENTIN M., JACQUELINE D., COTE P., Evaluation de l'état hydrique et de la masse volumique d'un sol argileux par des méthodes géophysiques combinées, 6^{ème} colloque GEOF CAN 25-26 septembre 2007, Bondy-France, Bondy, 2007

BECKER H., Die magnetometerprospektion, Denkmalpflege in Bayern, 75 Jahre Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege. Arbeitsh. Bayer. Landesamt für Denkmalpflege, 1983, vol.18, p.84-86

BENECH C., MARMET E., Optimum depth of investigation and conductivity response rejection of the different electromagnetic devices measuring apparent magnetic susceptibility, *Archaeological Prospection*, 1999, vol.6, n°1, p.31-45.

BESSON A., COUSIN I., SAMOUËLIAN A., BOIZARD H., RICHARD G., Structural heterogeneity of the soil tilled layer as characterized by 2D electrical resistivity surveying, *Soil and Tillage*, 2004, vol.79, n°2, p.239-249

BESSON A., Analyse de la variabilité spatio-temporelle de la teneur en eau des sols à l'échelle parcellaire par la méthode de la résistivité électrique, 216p., Thèse : Science de la Terre : Université d'Orléans : 2007

BLANCQUAERT G., Dourges, Plate-forme multimodale Delta, *Les Nouvelles de l'archéologie*, 2006, n°104/105, p.35-39

BLOUET V., Essais de comparaison de différentes méthodes d'étude archéologique préalable, L'archéologie en milieu rural, *Les Nouvelles de l'Archéologie*, 1994, n°58, p.17-19

BOËS X., ZEHACKER M., Etude d'impact archéologique sur l'emprise d'un parc d'activités à Sainte-Croix-en-Plaine, Rapport de diagnostic archéologique, AFAN, SRA Alsace, Strasbourg, 1996, 10p.

BONVALOT F., Houssen (68) : « Am Ostheimerweg », lotissement « Les Acacias », rue d'Ostheim/rue du cimetière, Rapport de diagnostic, PAIR, 2011, 76p.

BONVALOT F., Dambach (67) : Plateforme d'activités d'Alsace Centrale (tranche 2), Rapport de diagnostic, PAIR, 2010, 160p.

BONSALL J., GAFFNEY C., ARMIT I., Magnetic surveys are failing to find Archaeology: An analysis of legacy data from the West of Ireland, Archaeological Prospection Extended Abstracts, dir. par Drahor M.G. et Berge M.A., ISAP-CNSGAP, Archaeology and Art Publications, Izmir, 2011, p.58-64

BRINON C., SIMON F.X., TABBAGH A., Rapid 1D/3D Inversion of shallow resistivity multipole data : exemples in archaeological prospection, *Geophysics*, à paraître

BURG F., Horbourg-Wihr (68) : Lotissement du « Kreuzfeld », Rapport de diagnostic, 2007, 65p.

BURNOUF J., Des milieux et des hommes : méthodes d'étude en archéologie environnementales, *L'archéologie préventive dans le monde*, dir. par J.P. Demoule, La découverte, Paris, p.117-130

C

CAMPANA S., DABAS M., Archaeological Impact Assessment: The BREBEMI Project (Italy), *Archaeological Prospection*, 2011, vol. 18, n° 2, p.139-148

CIMINALE M., GALLO D., High-Resolution magnetic survey in a quasi-urban environment, *Near Surface Geophysics*, 2008, vol.6, n°2, p.97-103

CHATELET M., L'habitat du Haut Moyen Age de Roeschwoog "Schwartzacker" (Bas-Rhin): découverte d'un four à chaux et d'un nouveau site de référence pour la céramique, *Revue Archéologique de l'Est*, 2000, n°49, p.249-293

CHATELET M., *Fouilles et découvertes en Alsace*, Collection Histoire, Inrap, Editions Ouest-France, 2009, 143p.

CHAUVIN S., Horbourg-Wihr (68) : « Kreuzfeld » Tranche 2, Rapport de diagnostic, à paraître, 77p.

CHOUQUER G., Traité d'archéogéographie : La crise des récits géohistoriques, ed. Errance, Paris, 2008, 200p.

COLANI C., AITKEN M. J., A new type of locating device II - Field trials, *Archaeometry*, 1966, vol.9, p.9-19

COLANI C., AITKEN M.J., Utilization of magnetic viscosity effects in soils for archaeological prospection, *Nature*, 1966, vol.212, p.1446-1447

Collectif des personnels de la carte archéologique de la France (CPCAF), La réforme de l'archéologie préventive et l'élaboration de la carte archéologique de la France, *Les Nouvelles de l'Archéologie*, 2000, n°80, p.49-50

Conseil National de la Recherche Archéologique, Le diagnostic d'archéologie préventive, Avis n° 1 du CNRA 2008-2012, 2009, 7p.

Conseil National de la Recherche Archéologique, Le CNRA et la réforme de l'archéologie préventive, Avis n°1 du CNRA 1999-2002, 1999, 1p.

COSTA L., L'Atlas des patrimoines : un outil pour la gestion des territoires. L'exemple développé dans le Val-d'Oise, *Positionnement des collectivités territoriales dans la chaîne de l'archéologie : vers une logique de coopération* Actes de la table ronde Strasbourg 21-22 octobre 2005, ed. par Matthieu FUCHS, 2006, p.16-22

CROUTSCH C., LGV Est-Européenne, 2^{ème} phase, site 10-4 (Tronçon H), Mittelschaeffolsheim (67) : « Gute Abwand » : Indices d'occupations du Néolithique récent et du premier âge du Fer, Rapport de fouille, PAIR, Sélestat, 2011, 152p.

CROUTSCH C., Erstein (67) : Grassweg – PAE, Rapport de fouille, PAIR, Sélestat, 2008, 2 vol., 411p.-147p.

D

DABAS M., *Comportement magnétique des sols dans les domaines fréquentiel et temporel (ARV). Application à la prospection de sites archéologiques*, 271 p., Thèse : Géophysique Appliquée : Paris 6 : 1989

DABAS M., SKINNER J.R., Time-domain magnetization of soils (VRM), experimental relationship to quadrature susceptibility, *Geophysics*, 1993, vol.58, p.326-333

DABAS M., Diagnostic et évaluation du potentiel archéologique dans le cadre des traces linéaires : apport des SIG, *Revue d'Archéométrie*, 1999a, vol.5, p.23-42

DABAS M., Contribution de la géophysique à large maille et de la géostatistique à l'étude de traces autoroutiers – Application aux ferries de la Bussière sur l'A77, *Revue d'archéométrie*, 1999b, vol. 23, p.17-32

DABAS M., DELETANG H., FERDIERE A., JUNG C., ZIMMERMANN W.H., *La prospection*, Collection « Archéologiques », 2006, Errance, Paris, 225p.

DALAN R.A., Geophysical approach to buried site detection using down-hole susceptibility and soil magnetic techniques, *Archaeological Prospection*, 2006, vol.13, n°3, p.182-206

DAUGAS, J.-P., L'insertion de l'archéologie dans les différentes phases d'étude, L'archéologie en milieu rural, *Les Nouvelles de l'Archéologie*, 1994, vol. 58, p.6-9

DAVID A., LINFORD N., LINFORD P., MARTIN L., PAYNE A., *Geophysical Survey in Archaeological Field Evaluation*, English Heritage, Swindon, 2008, 59p.

DEARING J.A., DANN R.J.L., HAY K., *et al.*, Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials, *Geophysical Journal International*, 1996, vol.124, n°1, p.228-240

DELATTRE V., Diagnostics archéologiques et contextes funéraires : l'exemple atypique de la Bassée, Le diagnostic des ensembles funéraires : Actes du séminaire des 5 et 6 décembre 2005, Les cahiers de l'Inrap, Paris, 2007, p.44-51

DEMOULE J.P., Préface, *La France Archéologique, 20 ans d'aménagements et de découvertes*, Editions Hazan et Institut national de recherches archéologiques préventives, Paris, 2004, 256p.

DEMOULE J.P., GELIGNY F., LEHÖERFF A., SCHNAPP A., *Guide des méthodes de l'archéologie*, Grands Repères Guides, La découverte, 2009, 336p.

DEMOULE J.-P., The crisis – economic, ideological and archaeological, *Archaeology and the global economic crisis - Multiple impacts, possible solutions*, dir. N. Schlanger, K. Aitchinson, Culture Lab Editions, Bruxelles, 2010, p.13-18

DESVIGNES G., TABBAGH A., Simultaneous Interpretation of magnetic and electromagnetic prospecting for characterization of magnetic features, *Archaeological Prospection*, 1995, vol.2, n°3, p.129-139

DREAL-ADEUS-AUR, *30 ans d'urbanisation en Alsace : consommation foncière et fonctionnement du territoire*, Direction Régionale de l'Équipement d'Alsace, Agence de l'Urbanisme de la région mulhousienne, Agence de développement et de l'urbanisme de l'agglomération strasbourgeoise, Strasbourg, 2007, Chapitre II – mesure de la consommation foncière Disponible sur: http://webissimo.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/etude_30ans_urba_alsace_rap2_cle56487e.pdf

DUBOULOZ J., L'évaluation des méthodes de diagnostic simulations sur des sites de l'Aisne, *Les Nouvelles de l'Archéologie*, 2003, vol. 91, p.46-50

DUCHAUFOR P., *Introduction à la science du sol : sol, végétation, environnement*, 6^{ème} éd., Dunod, Paris, 2001, 331p.

DUCOMET G., DRUELLE P., Géophysique et archéologie préventive : L'expérience du TGV Sud-est, *AFAN Infos*, 1996, p.4-9

DZIEGIELEWSKI K., DZIEGIELEWSKA M., Roman SZCZERBA R., Dual hollowed structures from celtic settlement at Podleze (southern Poland): natural or anthropogenic phenomenon?, *Des trous... Structures en creux pré- et protohistoriques, Actes du colloque de Dijon et Baume-les-Messieurs, 24-26 mars 2006*, dir. par Marie-Chantal Frère-Sautot, Editions Monique Mergoil, Montagnac, 2006, p.391-404

E

ERTLEN D., *Archivage pédologique et dynamiques environnementales : Mise au point d'une méthode de reconnaissance des paléovégétations, fondée sur l'analyse spectroscopique dans le proche infrarouge (SPIR) des matières organiques de sols et paléosol*, 378 p., Thèse : Géographie : Université de Strasbourg : 2009

F

FASSBINDER J., STANJEK H., VALI H., Occurrence of magnetic bacteria in soil, *Nature*, 1990, vol.343, p.161-163

FASSBINDER J., STANJEK H., Magnetic properties of biogenic soil greigite (Fe₃S₄), *Geophysical Research Letters*, 1994, vol.21, n°22, p.2349-2352

FERDIERE A., Prospection, diagnostic, évaluation dans l'archéologie préventive en milieu rural : quelques réflexions à propos de la table ronde de Dijon, Le diagnostic en milieu rural, *Les nouvelles de l'archéologie*, 1994, n°58, p.45-48

FERRIER A., Sainte-Croix-en-Plaine (68) : RD 201 – Centre de première intervention et ateliers municipaux : 14-18 décembre 2009, Rapport de diagnostic, PAIR, 2009, 59p.

FERRIER A., Ensisheim (68) : RD201 – Liaison routière entre la RD430 et l'autoroute A35 – 2010 : un espace funéraire diachronique : incinérations protohistoriques et nécropole mérovingienne : du 15 au 30 novembre 2010a, Rapport de diagnostic, PAIR, 2010, 128p.

FERRIER A., Ensisheim (68) « Regusiheimer Feld », ZAID de Ensisheim/Reguisheim [Tranche 1], Rapport de diagnostic, PAIR, 2010b, 80p.

FERRIER A., Obernai (67) : Schulbach, Nouvel Hôpital : 2-12 nov. 2009 et 20-21 jan. 2010, Rapport de diagnostic, 2010, 104p.

FERRIER A., Sainte-Croix-en-Plaine (68) : « Allmend »-2011 : Installation du poste électrique de Sainte-Croix-en-Plaine et son raccordement à la ligne électrique « Logelbach-Voie Romaine », Rapport de diagnostic, PAIR, 2011, 68p.

FLEISCHER F., LEPROVOST C., PETER C., La fouille archéologique de la zone nord de la future Plateforme Départementale d'Activité et de Brumath entre Bernolsheim, Société d'histoire de Brumath et environs, 2011, vol. 39, p.25-28

FINE P., SINGER M.J., LA VEN R., VEROSUB K., SOUTHARD R.J., Role of pedogenesis in distribution of magnetic susceptibility in two california chronosequence, *Geoderma*, 1989, vol.44, n°4, p.287-306

FLOTTE P., Horbourg-Wihr (68) : « Kreuzfeld » Un quartier d'agglomération gallo-romaine, à paraître, 3 vol., 987p.

FOUCAULT A., RAOULT J.F., *Dictionnaire de géologie*, 6^{ème} éd., Masson, Paris, 1988, 382p.

FREKE A.M., TATE D., The formation of magnetic iron sulphide by bacterial reduction in iron solutions, *Journal of Biochemical and Microbiological Technology and Engineering*, 1961, vol.3, n°1, p.29-39

FRÖHLICH N., POSSELT M., SCHLEIFER N., Fouilles à l'aveugle : «Les fantômes magnétiques » un phénomène nouveau qui témoigne de l'importance des prospections géophysiques en archéologie, La prospection géophysique, *Les dossiers d'archéologie*, Dijon, 2005, n°308, p.44-50

G

GAFFNEY C.F., GATER J.A., OVENDEN S.M., The use of geophysical techniques in archaeological evaluations, *Institute for field archaeologist Technical papers*, n°9, Birmingham, 1991, 16p.

GEORJON C., CROUTSCH C., Sainte-Croix-en-Plaine "Zone Artisanale", Rapport de diagnostic archéologique, AFAN, SRA Alsace, Strasbourg, 1997, 40p.

GHEQUIERE A., GIAZZON D., MARCIGNY C., BARBIER-PAIN D., HULIN G., L'enceinte néolithique moyen de Goulet "Le Mont" (Orne) dans son contexte environnemental, Le Néolithique du Nord de la France dans son contexte européen, *Revue Archéologique de Picardie*, 2011, n° spécial 28, p.139-205

GLEIZES M.-F., HERON C., De la carte archéologique à l'Atlas du patrimoine en Seine-Saint-Denis, *Positionnement des collectivités territoriales dans la chaîne de l'archéologie : vers une logique de coopération* Actes de la table ronde Strasbourg 21-22 octobre 2005, ed. par Matthieu FUCHS, 2006, p.13-15

GOBAT J.M., ARAGNO M., MATTHEY W., *Le sol vivant – base de pédologie, biologie des sols*, *Collection Gérer l'environnement*, Presse Polytechniques et universitaires Romandes, Lausanne, 1998, 519p.

GRAHAM I.D.G., SCOLLAR I., Limitations on magnetic prospection imposed by soil properties, *Archaeophysika*, 1976, vol.6, p.1-39

GUERIN R., MEHANI Y., RAKOTONDRA SOA G., TABBAGH A., Interpretation of Slingram conductivity mapping in near-surface geophysics: using a single parameter fitting with 1D model, *Geophysical Prospecting*, 1996, vol. 44, n°2, p.233-249

H

HANESCH M., SCHOLGER R., Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements, *Environmental Geology*, 2002, vol.42, n°8, p.857-870

HESSE A., *Prospections géophysique à faible profondeur; applications à l'archéologie*, Dunod, Paris, 1966, 149p.

HESSE A., JOLIVET A., REMY J., *Manuel de prospection géophysique appliquée à la reconnaissance archéologique*, Centre de recherche sur les techniques gréco-romaines, Dijon, 1978, 127p.

HESSE A., BOSSUET G., REMY J., RENIMEL S., TABBAGH A., Succès de l'archéologie prospective à Saint-Romain-en-Gal, *Archeologia*, 1978, n°122, p.7-18

HESSE A., Multi-parameter survey for archaeology: how and why or how and why not? *Journal of Applied Geophysics*, 1999, vol.41, n°2-3, p.157-168

HESSE A., Count Robert du Mesnil du Buisson (1895-1986) a French precursor in geophysical survey for archaeology, *Archaeological Prospection*, 2000, vol.7, n°1, p.43-49

HEY G., LACEY M., *Evaluation of archaeological decision-making processes and sampling strategies*, Oxford archaeological Unit, Planarch Project, 2001, 104 p.

HOFFMANN V., Greigite (Fe₃S₄): magnetic properties and first domain observations, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1992, vol.70, n°3-4, p.288-301

HOWELL H., A soil conductivity meter, *Archaeometry*, 1966, vol.9, p.20-23

HULIN G., *Etude de faisabilité d'une plateforme géophysique pour la prospection archéologique à grande échelle, Rapport de fin d'étude - Geocarta*, EOST, Strasbourg, 2007

HULIN G., BROES F., FECHNER K., Caractérisation de phénomènes anthropiques par la mesure de la susceptibilité magnétique sur surface décapée : Premiers résultats sur le projet Canal Seine-Nord Europe, à paraître

I

ISARIN R., VERHAGEN P., GOUDSWAARD B., Archaeology as a risk in spatial planing : maneuvering between objectivity and subjectivity, *Archaeological Prediction and Risk Management : Alternatives to current practices*, dir. par Hans Kamermans, Matijn van Leusen et Philip Verhagen, Leiden University Press, Leiden, 2009, p.41-49

J

JACQUES A., PRILAUX G., Représentativité des sites protohistoriques et gallo-romains en Atrébatie, *Les Nouvelles de l'Archéologie*, 2006, n°104/105, p.46-50

JEUDY F., WÜTTMANN J.L., Sainte-Croix-en-Plaine (Haut-Rhin) « Lotissement Rue Mermoz », Rapport d'évaluation archéologique, AFAN, SRA Alsace, Strasbourg, 1999, 21p.

JOB J.O., TABBAGH A., HACHICHA M., Détermination par méthode électromagnétique de la concentration en sel d'un sol irrigué. *Canadian Journal of Soil Science*, 1995, vol.75, p.463-469

JORDAN D., How effective is geophysical survey? A regional review, *Archaeological Prospection*, 2009, vol.16, n°2, p.77-90

K

KAMERMANS H., VAN LEUSEN M., VERHAGEN P., Archaeological prediction and risk management, *Archaeological Prediction and Risk Management : Alternatives to current practices*, dir. par Hans Kamermans, Matijn van Leusen and Philip Verhagen, Leiden University Press, Leiden, 2009, p.9-18

KATTENBERG A. E., *The application of magnetic methods for dutch resource management*, Geoarchaeological and Bioarchaeological Studies, n°9, 2008, 192p.

KLETESCHKA G., BANERJEE S.K., Magnetic stratigraphy of Chinese loess as a record of natural fires, *Geophysical Research Letters*, 1995, vol.22, n°11, p.1341-1343

KOZIOL A., Roeschwoog (67) : Lotissement "Am Wassturm" : Habitat rural et ensemble funéraire du haut Moyen-Age (fin du 6ème début du 10ème siècle). Etude géomorphologique d'une portion de la plaine alluviale du Ried Nord, Rapport de fouille, 2012, 3 vol., 803p.

KUHNLE G., BOËS E., MENTELE S., Sainte-Croix-en-Plaine « Jebesen Boden » (Haut-Rhin), DFS de fouilles d'évaluation archéologique et de fouille d'urgence absolue, AFAN, SRA Alsace, Strasbourg, 1999, 2 vol., 54p.

KUHNLE G., Dambach-la-Ville (67) : »Wilmstein«, plateforme départementale d'activités – tranche 1, Rapport de fouille, Inrap, Strasbourg, 2004, 5 vol.

L

LANDOLT M., Entzheim-Geispolsheim (67) : Lotissement d'activités Entzheim 4 (AEROPARC-CUS), Rapport de fouilles, PAIR, Sélestat, à paraître

LANDOLT M., Sainte-Croix-en-Plaine (68) : ZA communale entre la RD201 et l'A35, « Holzackerfeld » : 2007, Rapport de diagnostic, PAIR, Sélestat, 113p.

LAROCHE M.C., Analyse des solutions adoptées en Grande Bretagne et en Allemagne pour la mise en œuvre de la reconnaissance archéologique, Rapport, 1998, 30p.

LAVIGNE C., L'archéogéographie, une expertise au service des politiques publiques d'aménagement. L'exemple de la commune de Bègles (Gironde), *Les Nouvelles de l'Archéologie*, 2011, n°125, p.47-54

LE BORGNE E., Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel, *Annales de Géophysique*, 1955, vol.11, p.399-419

LE BORGNE E., 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*, 1960a, vol. 16, p.445-496

LE BORGNE E., Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol sur celles du schiste et du granite, *Annales de Géophysique*, 1960b, vol.16, p.159-196

LINFORD N.T., Magnetic Ghosts: Mineral magnetic measurements on roman and anglo-saxon graves, *Archaeological Prospection*, 2004, vol.11, n°3, p.167-180

LINFORD N., The application of geophysical methods to archaeological prospection, *Reports on Progress in Physics*, 2006, vol.69, n°7, p.2205-2257

LINFORD N., LINFORD P., MARTIN L., PAYNE A., Recent results from the English Heritage Caesium magnetometer system in comparison with recent fluxgate gradiometers, *Archaeological Prospection*, 2007, vol. 14, n°3, p.151-166

LIU X., HESSE P., ROLPH T., Origin of maghaemite in chinese loess deposits: aeolian or pedogenic?, *Physics and Earth Planetary Interior*, 1999, vol.112, p.191-201

LOGEL T., Soultz-Haut-Rhin (68) : Aire d'activités du Florival, Tranche 1, Un bâtiment du Néolithique ancien, des occupations de l'âge du Fer et de la période moderne (XVI^{ème} siècle), Rapport de fouille, PAIR, Sélestat, 2011, 292p.

LOGEL T., Ostheim (67) : Birgelsgaerten - 2007, Rapport de fouille, PAIR, Sélestat, à paraître

LOMBARDO J.-L., L'accessibilité aux terrains : L'exemple de l'autoroute A16, L'archéologie en milieu rural, *Les Nouvelles de l'Archéologie*, 1994, n°58, p.11-14

M

Mc CARTER W.J.M., The electrical resistivity characteristics of compacted clays, *Géotechnique*, 1984, vol.36, n°2, p.263-267

MAHER B. A., TAYLOR R.M., Formation of ultrafine-grained magnetite in soils, *Nature*, 1988, vol. 336, p.368-370

MAHER B.A., THOMPSON R., Paleorainfall reconstructions from pedogenic magnetic susceptibility variations in the Chinese loess and paleosols, *Quaternary Research*, 1995, vol.44, p.383-391

MANN S, SPARKS N.H.C., FRANKEL R.B., BAZYLINSKI D.A., JANMASH H.W., Biomineralization of ferrimagnetic greigite (Fe₃S₄) and iron pyrite (FeS₂) in a magnetotactic bacterium, *Nature*, 1990, vol.343, p.258-261

MARMET E., BINA M., FEDROFF N., TABBAGH A., Relationship between human activity and the magnetic properties of soils : a case study in the medieval site of Roissy en France, *Archaeological Prospection*, 1999, vol.6, n°3, p.161-170

MARMET E., *Cartographie à large maille de la susceptibilité magnétique du sol pour une évaluation archéologique sur les grands tracés*, 236p., Thèse : Géophysique Appliquée : Paris 6 : 2000

MARMET E., BEST C., TABBAGH A., Prospection systématique par sondages à la pelle mécanique : Limites liées à la probabilité de découverte de sites archéologiques, *La revue d'archéométrie*, 2002, vol.26, p.11-21

MARTIN G., Quels outils utiliser avant la mise en place des moyens mécaniques, L'archéologie préventive en milieu rural, *Les Nouvelles de l'Archéologie*, 1994, n°58, p.17-19

MARTIN S., La villa gallo-romaine de Saint-Martin 1 à Chabrillon (Drôme), *Archéologie du TGV Méditerranée, Fiches de synthèse, Antiquité, Moyen-âge, Epoque moderne*, Monographies d'archéologie méditerranéenne, Lattes, n°10, 2002, p.700-710

Mc NEILL J.D., Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers, Geonics, *Technical Note*, n°6, 1980, 14p.

Mc NEILL J.D., Electrical conductivity of soils and rocks, Geonics, *Technical Note*, 1980, n°5, 22p.

MEHENI Y., GUÉRIN R., BENDERITTER Y., TABBAGH A., Subsurface DC resistivity mapping: approximate 1-D interpretation, *Journal of applied geophysics*, 1996, vol. 34, n°4, p.255-270

Du MESNIL du BUISSON R., *La technique des fouilles archéologiques – Les principes généraux*, Pacteau, Paris, 1934, 256p.

MICHOT D., *Intérêt de la géophysique de sub-surface et de la détection multi-spectrale pour la cartographie des sols et le suivi de leur fonctionnement hydrique à l'échelle intra parcellaire*, p.394, Thèse : Environnement et agronomie : Paris 6 : 2003

MISCHLER F., Eckartswiller (67) : « Rothlach » : 6 avril-2 mai 2010, Rapport de fouille, PAIR, Sélestat, 2010, 138p.

MOSKOWITZ B.M., FRANKEL R.B., BAZYLINSKI D.A., Magnetic criteria for the detection of biogenic magnetite, *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, vol.120, n°3-4, p.238-300

Mc PHAIL R.I., « Dark Earth » : recent studies of « dark earth » and « dark earth like » microstratigraphy in England, *Dark earth Terres Noires*, éd. Verslype, Louvain, 2004, p.35-42

MULLINS C.E., TITE M.S., Magnetic viscosity, quadrature susceptibility, and frequency dependance of susceptibility in single-domain assemblies of magnetite and maghémite, *Journal of geophysical research*, 1973, vol.78, n°5, p.804-809

MULLINS C.E., The magnetic properties of the soil and their application to archaeological prospecting, *Archaeophysika*, 1974, n°5, p.143-347

MULLINS C.E., Magnetic susceptibility of the soils and its significance in soil science - a review, *Journal of Soil Science*, 1977, vol.28, n°2, p.223-246

N

NEEL L., Théorie du traînage magnétique des ferromagnétiques en grains fins avec applications aux terres cuites, *Annales de Géophysique*, 1949, vol.5, n° 2, p.99-136

P

PALACKY G.J., Resistivity of Geologic Targets, *Electromagnetic methods in applied geophysics – theory*, vol.1, dir. par N. Nabighian, SEG, 1987 p.53-130

PANISSOD C., DABAS M., La reconnaissance des sols historiques urbains par méthodes géophysiques, *Histoire et Mesure*, 1999, vol.14, n°3-4, p.221-248

PARCHAS C., TABBAGH A., Simultaneous measurements of electrical conductivity and magnetic susceptibility of the ground in electromagnetic prospecting, *Archaeophysika*, 1978, vol.10, p.682-691

PETER C., LGV Est-Européenne, 2ème phase. Steinbourg (67) : « Lohrberg » zone de dépôt 1, « Altenberg » zone de dépôt 2, Rapport de diagnostic, 2009, 116p.

PETER C., Bernolsheim, Mommenheim (67) : Plateforme Départementale d'Activités (Phase 1, zone Nord) : 23 novembre 2009-11 mars 2010, Rapport de diagnostic, 2010, 3 vol., 256p.

PETER C., Soultz et Issenheim (68) : projet d'aire d'activité du Florival : 2008, Rapport de diagnostic, PAIR, Sélestat, 2008, 90p.

PÉTRONILLE M., THIESSON J., SIMON F.X., BUSCHENCHUTZ O. Magnetic signal Prospection using multi-parameter measurements: the case study of the Gallic Site of Levroux, *Archaeological Prospection*, 2010, vol.17, n°3, p.141-150

PETRONILLE M., *Contribution à la caractérisation du type d'occupation des sols à partir des propriétés magnétiques*, 315p., Thèse : Géophysique Appliquée : UPMC : 2009

PLOUIN S., GITTA C., Impact archéologique de l'autoroute A35 (Rocade Est de Colmar) Sainte-Croix-en-Plaine/Houssen, Rapport de prospection, 1988

Q

QUERRIEN A., MOULIN J., TABBAGH A., Confrontation of geophysical survey, soil studies and excavation data to evidence tillage erosion, GEOFCAN-ICAP, *Archéosciences*, n°33, p.195-198

R

RAMSEYER D., Interprétation des structures : entre imaginaire et réalité, *Des trous... Structures en creux pré- et protohistoriques*, Actes du colloque de Dijon et Baume-les-Messieurs, 24-26 mars 2006, dir. par Marie-Chantal Frère-Sautot, Editions Monique Mergoil, Montagnac, 2006, p.91-96

REDDE M., Le projet Oedenburg, *Oedenburg, vol.1, Les camps militaires Julio-claudiens*, dir. par M. Reddé, RGZM, Mainz, 2009, M.79, p.1-6

RETHORE P., Bâtiment gallo-romain de la Paillette à Montmeyran (Blagnat, Drôme) – Fiche n°68, *Archéologie du TGV Méditerranée, Fiches de synthèse, Antiquité, Moyen-âge, Epoque moderne*, Monographies d'archéologie méditerranéenne, Lattes, n°10, 2002, p.659-664

REUTENAUER F., Bernardvillé (67) : Baumgarten : 2009, Rapport de diagnostic, PAIR, 2009, 66p.

REUTENAUER F., BOLLY A., Duntzenheim(67) : LGV Est-Européenne 2ème phase, Duntzenheim, Rapport de fouille, 2009, 66p.

ROBERT S., Archéologie préventive et morphologie du paysage deux points de vue scientifiques différents, *Actes du colloque AGER V : Actualité de la recherche en histoire et archéologie agraire, Besançon, 19-20 septembre*, Presses Universitaires Francontoises, 2000, p.41-53

ROUGIER V., *Les structures de combustion à remplissage de galets chauffés de Sierrentz (Bronze final)*, 194p., Mémoire de maîtrise : Archéologie : Université Marc Bloch Strasbourg : 2001

RUMMERY, T. A., BLOEMENDAL J., J. DEARING, OLDFIELD F., THOMPSON R., The persistence of re-induced magnetic oxides in soils and lake sediments, *Annales de Géophysique*, 1979, vol.35, n°2, p.103-107

S

- SAARENTEKO T., Electrical properties of water in clay and silty soils, *Journal of Applied Geophysics*, 1998, vol.40, n°1-3, p.73-88
- SAMOUELIAN A., COUSIN I., TABBAGH A., BRUNAD B., RICHARD G., Electrical resistivity survey in soil science : a review, *Soil and Tillage Research*, 2005, vol.83, p.173-193
- SCHLANGER N., ROSENBACH K.S., One crisis too many? French archaeology between reform and relaunch, *Archaeology and the global economic crisis - Multiple impacts, possible solutions*, dir. N. Schlanger, K. Aitchinson, Culture Lab Editions, Bruxelles, 2010, p.69-80
- SCHWERTMANN U., The effect of pedogenic environments on iron oxide minerals, *Advance in Soil Science*, 1995, vol.1, p.172-200
- SCOLLAR I., TABBAGH A., HESSE A., HERZOG I., *Archaeological Prospecting and Remote Sensing*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990, 696p.
- SCOLLAR I., Electromagnetic prospecting methods in archaeology, *Archaeometry*, 1962, vol.5, n°1, p.146-152
- SEGER M., COUSIN I., FRISON A., BOIZARD H., RICHARD G., Characterization of the structural heterogeneity of the soil tilled layer by using in situ 2D and 3D electrical resistivity measurements, *Soil and Tillage Research*, 2009, vol.103, p.387-398
- SELADJI S., *Caractérisation et suivi par méthodes géoélectriques de la dégradation physique des sols agricoles et forestiers liées au tassement*, 220p., Thèse : Géophysique Appliquée : Paris 6 : 2010
- SELL Y., BERCHTOLD J.P., CALLOT H., HOFF M., GALL J.C., WALTER J.M., *L'Alsace et les Vosges : Géologie, milieu naturels, flore et faune*, La bibliothèque du naturaliste, Delachaux et Niestlé, Lausanne, 1998, 352p.
- SELLAMI F., Lecture pédologique comme moyen d'identification des structures négatives, *Des trous... Structures en creux pré- et protohistoriques, Actes du colloque de Dijon et Baume-les-Messieurs, 24-26 mars 2006*, dir. par Marie-Chantal Frère-Sautot, Editions Monique Mergoïl, Montagnac, 2006, p.109-118
- SCHMITT L., *Typologie hydro-géomorphologique fonctionnelle de cours d'eau. Recherche méthodologique appliquée aux systèmes fluviaux d'Alsace*, 323 p., Thèse : Géographie Physique : Université Louis Pasteur : 2001
- SCHNEIKERT F., Dambach-la-Ville (67): "Wassenmatten", lotissement "Les Prés Fleuris":2007, Rapport de diagnostic, Inrap, Strasbourg, 2007, 30p.
- SCHNEIKERT F., Duntzenheim « Sonnenrain », « Steinberg », « Lupfengasse », « Lupflenmatt », Vestiges d'une villa gallo-romaine et d'un habitat médiéval, Sites 7 4-5, LGV Est Européenne 2^{ème} phase, Document intermédiaire de diagnostic archéologique, 2008, 61p.
- SIMON F.X., *Exemple d'application de la géophysique en archéologie préventive : Validation d'une nouvelle plateforme d'acquisition magnétique et confrontation des résultats de prospections géophysiques aux observations archéologiques*, Mémoire de M2 recherche, Paris, 2008, 55p.

SIMON F.X., Sainte-Croix-en-Plaine (68) : “Jebsen Boden”, “Oberes Holzackerfeld”, Prospection géophysique – 2009, Rapport de prospection géophysique, PAIR, 2010, 46p.

T

TABBAGH A., Les propriétés thermiques des sols, premiers résultats utilisables en prospection archéologique, *ArcheoPhysica*, 1974, vol.6, p.128-148

TABBAGH A., On the comparison between magnetic and electromagnetic prospection methods for magnetic features detection, *Archaeometry*, 1984, vol.26, n°2, p.171-182

TABBAGH A., Applications and advantage of the Slingram electromagnetic method for archaeological prospecting, *Geophysics*, 1986a, vol.51, n°3, p.576-584

TABBAGH A., What is the best coil orientation in the Slingram electromagnetic prospecting method? *Archaeometry*, 1986b, vol.28, n°2, p.185-196

TABBAGH A., DABAS M., Absolute magnetic viscosity determination using time domain electromagnetic devices, *Archaeological Prospection*, 1998, vol.3, n°4, p.199-208

TABBAGH A., Réflexions sur l'archéologie environnementale – Communication et valorisation, *Les nouvelles de l'Archéologie*, 1999, n°78, p.35

TABBAGH A., DABAS M., HESSE A., PANISSOD C., Soil resistivity: a non invasive tool to map soil structure horization, *Geoderma*, 2000, vol.97, n°3-4, p.393-404

TABBAGH J., Total field magnetic prospection: are vertical gradiometer measurements preferable to single sensor survey?, *Archaeological Prospection*, 2003, vol.10, n°2, p.75-81

TALON M., Le projet européen Planarch 1, *Les nouvelles de l'archéologie*, 2004, n°97, p.32-34

TAYLOR R.M., SCHWERTMANN U., Maghemite in soils: the synthesis of singledomain and superparamagnetic magnetite, *Clay Minerals*, 1974, vol.22, p.441-422

TELFORD W.M., GELDART L.P., SHERIFF R.E., KEYS D.A., *Applied geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1976, 860p.

THELLIER E., Sur l'aimantation des terres cuites et ses applications en géophysique, Les presses universitaires de France, Paris, 1938, 146p.

THIESSON J., *Mesure et cartographie de la viscosité magnétique des sols*, 91 p. Thèse : Géophysique Appliquée : Paris VI : 2007

THIESSON, J., A. TABBAGH, S. FLAGEUL, TDEM magnetic viscosity prospecting using a Slingram coil configuration, *Near Surface Geophysics*, 2007, vol.5, p.363-374

THIESSON J., DABAS M., FLAGEUL S., Detection of resistive features using towed Slingram electromagnetic induction instruments, *Archaeological Prospection*, 2009, vol.16, n°2, p.103-109

THIESSON J., ROUSSELLE G., SIMON F.-X., TABBAGH A., Slingram EMI prospection: Are vertical orientated devices a suitable solution in archaeological and pedological prospection ?, *Journal of applied geophysics*, 2011, vol.75, n°4, p.731-737

THOMPSON R., OLDFIELD F., *Environmental magnetism*, Allen & Unwin, Londres, 1986, 276p.

TITE M.S., MULLINS C., Electromagnetic prospecting: a preliminary investigation, *Propezioni Archeologiche*, 1969, vol.4, p.95-102

TITE M.S., MULLINS C., Electromagnetic prospecting on archaeological sites using a soil conductivity meter, *Archaeometry*, 1970, vol.12, p.97-104

TITE M. S., MULLINS C., Enhancement of the magnetic susceptibility of soils on archaeological sites, *Archaeometry*, 1971, vol.13, n°2, p. 209-219

V

VERHAGEN P., BORSBOOM A., The design of effective and efficient trial trenching strategies for discovering archaeological sites, *Journal of Archaeological Science*, 2009, vol.36, n°8, p.1807-1815

VEBER C., Sainte-Croix-en-Plaine (68) : Ancien échangeur/gendarmerie : 2005 : nécropole à incinérations et inhumations occupée de la fin du Bronze final à La Tène A, Rapport de fouille, Inrap, Strasbourg, 2006, 2vol., 156p.

VODYANITSKII Y.N., NIKIFOROVA A.S., ZAIDEL'MAN F.R., Magnetic susceptibility of concretions of the southern taiga zone, *Eurasian Soil Science*, 1997, vol.30, n°12, p.1294-1301

VOGT H., *Le relief en Alsace, Etude géomorphologique du rebord sud-occidental du fosse rhenan*, Oberlin, Strasbourg, 1992, 239p.

VON DER OSTEN-WALDENBURG H., CHAUME B., REINHARD W., Magnetic imaging of a late Bronze Age tumulus in France before and during excavation., *The Leading Edge*, 2002, vol.21, p.465

VON DER OSTEN-WALDENBURG H., Zur Filterwirkung des Hp-Horizontes auf geomagnetisch Anomalien. Grabungsbeleitende Propetionen am Mont Lassois (Burgon-Frankreich), *Geophysik und Ausgrabung*, Naturwissenschaft und Technologie, n°6, dir. par M. Posselt, B. Zickgraf, C. Dobiak, Verlag Marie Leidorf GmbH, Rahden, 2007, p.55-68

W

WATTEZ J., JALLOT L., L'interdisciplinarité en archéologie préventive la question de l'archéologie de l'environnement, *Les Nouvelles de l'Archéologie*, 2001, n°86, p.28-30

WERBAN U., HAGREY S.A., RABEL W., Monitoring of root-zone water content in the laboratory by 2D geoelectrical tomography, *Plant Nutritional and Soil Science*, 2008, vol.171, n°6, p.927-935

WESTON D.G., Alluvium and geophysical prospection, *Archaeological Prospection*, 2001, vol.8, n°4, p.265-272

WILLIAMS M., Evidence for the dissolution of magnetite in recent Scottish peats, *Quaternary research*, 1992, vol.37, n°2, p.171-182

Z

ZEHNER M., Sainte-Croix-en-Plaine, zone d'activité II "Holzackerfeld" (Haut-Rhin), Document Final de Synthèse – Fouilles de sauvetage urgent, ANTEA, SRA Alsace, Strasbourg, 2004, 51p.

ZEHNER M., Le Haut-Rhin (68), Carte archéologique de la Gaule, Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, Paris, 1998, 375p.

*

TABLES DES FIGURES

Figure 1 : Classes de résistivité de roches et solution (Palacky 1987).....	32
Figure 2 : Conductivité électrique de sols argileux en fonction de la teneur en eau volumique et de la teneur en argile (38 % Beaumont clay, 35 % Houston back clay, 14 % Eddy et 20 % Kaolinitic clay (Saarenketo 1998).....	33
Figure 3 : Loi de variation en fonction de la température d'une argile à l'état saturé (station fixe de Garchy) (Hesse 1966).....	34
Figure 4 : Résistivité en fonction de la saturation pour des sables fins sans et avec jeunes racines (Werban <i>et al.</i> 2008).....	37
Figure 5 : a, comportement ferromagnétique; b, comportement antiferromagnétique strict; c, comportement antiferromagnétique dévié; d, comportement ferrimagnétique (Thiesson 2007)	40
Figure 6 : Rotation progressive des spins à la frontière entre deux domaines d'orientations opposées (Thiesson 2007).....	41
Figure 7 : Schéma des différents chemins menant vers la formation de formes de grains magnétiques (Linford 2006).....	43
Figure 8 : Influence de la perturbation du milieu sur l'aimantation rémanente macroscopique (Thiesson 2007).....	45
Figure 9 : Variation de K_{ph} (triangle) et K_{qu} (cercle) en fonction de la fréquence (Dabas <i>et al.</i> 1992)	46
Figure 10 : Images de uranyl-acetate-stained magnetic bacteria de l'horizon Ah d'un moor (Fassbinder 1990).....	48
Figure 11 : Courbe thermomagnétique montrant vers 260°C une forte augmentation de la susceptibilité liée à la transformation de la lépidocrocite en magnétite (Marmet 2000).....	50
Figure 12 : Relation entre précipitation annuelle et susceptibilité magnétique sur des sols modernes sur 9 sites sur le plateau loessique chinois (précipitation en mm/an et susceptibilité en $10^{-8} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ (Maher et Thompson 1995).....	52
Figure 13 : Relation entre susceptibilité magnétique et végétation (prés, bois de conifères et bois mixtes) (Marmet 2000).....	53
Figure 14 : Mesure de susceptibilité magnétique à large maille sur la zone 53 de l'A89 montrant de fortes valeurs liées à la chauffe du sol (Marmet 2000).....	55
Figure 15 : Carte de susceptibilité magnétique sur le site de Chassenon qui révèlent les zones d'occupations archéologiques P1 à P5 (Marmet 2002).....	56
Figure 16 : Caractéristique des différentes configurations d'implantation d'électrode (Samouëlian <i>et al.</i> 2005).....	57
Figure 17 : Configurations d'électrodes utilisées dans le cadre des prospections	58
Figure 18 : Mise en oeuvre du panneau électrique sur le site de Sainte-Croix-en-Plaine	61
Figure 19 : Dispositif électrique, RM15 (Geoscan Research) et schéma de mesures	62
Figure 20 : Schématisation de la signature d'une anomalie produite par une structure magnétique (d'après Hesse 1978 et Hulin 2007).....	63
Figure 21 : Comparaison entre les mesures avec un magnétomètre à vapeur de Césium en champ total (à gauche) et un gradiomètre fluxgate (Bartington) (Linford <i>et al.</i> 2007).....	64
Figure 22 : Magnétomètre à vapeur de Césium, G-858 (Geometrics) en mode pseudo-gradient vertical	65
Figure 23 : Configuration des bobines EM Slingram (Tabbagh 1986b)	68
Figure 24 : Le conductivimètre-susceptibilimètre CS60 (Laboratoire Sisyphe).....	68

Figure 25 : Le susceptibilimètre MS2-D (Bartington)	69
Figure 26 : Carte de répartition des études géophysiques de sites archéologiques	73
Figure 27 : Coupe structurale du fossé rhénan au nord et au sud du massif vosgien (Ertlen 2009).....	76
Figure 28 : Carte pédologiques de l'Alsace (Ertlen 2009)	79
Figure 29 : Transition entre la terrasse würmienne et les formations géomorphologiques du Grand Ried Central d'Alsace (Schmitt 2001)	82
Figure 30 : Carte des entités géologiques alsaciennes définissant les trois entités géographiques (plaine, collines calcaires et lœssiques, massif vosgien et piémont) (d'après Sell <i>et al.</i> 1998).....	85
Figure 31 : Répartition fonctionnelle du territoire aménagé en Alsace en 2006 (données CorineLandCover).....	86
Figure 32 : Modification de l'occupation des sols entre 1990 et 2000 en Alsace (données CorineLandCover).....	87
Figure 33 : Modification de l'occupation des sols entre 2000 et 2006 en Alsace données (données CorineLandCover).....	88
Figure 34 : Evolution des extensions urbaines significatives (en %) sur la région Alsace (DREAL 2007).....	89
Figure 35 : Carte d'occupation des sols; on distingue en vert foncé les parcelles cultivées en maïs. La couleur verte associé à la monoculture du maïs dans la plaine dessine nettement les contours de l'Alsace (hors Alsace Bossue et Massif vosgiens) (source IGN).....	90
Figure 36 : Carte de localisation du site de Bernardvillé (source IGN)	92
Figure 37 : Log stratigraphique qui met en évidence le niveau de démolition limoneux et le substrat argileux (cliché F. Reutenauer)	92
Figure 38 : Orthophoto de l'environnement du site et localisation de la prospection (source IGN).....	93
Figure 39 : Plan archéologiques des découvertes effectuées lors de l'excavation par tranchées dans le quart nord ouest de l'emprise du diagnostic (Reutenauer 2009).....	94
Figure 40 : A gauche : sépultures dans la zone cimetériale présentant un comblement argileux dans un substrat argileux, à droite le mur de clôture de la zone cimetériale (clichés F. Reutenauer)	95
Figure 41 : Vue du mur d'enceinte du cimetière avec en premier plan le niveau de démolition observé sur les cartes électriques (cliché F. Reutenauer).....	96
Figure 42 : Fossé FO3, non détecté, présentant un comblement argileux dans un encaissant argileux (cliché F. Reutenauer)	97
Figure 43 : Carte de résistivité électrique apparente avec un écartement inter-électrodes de 0.5 m en configuration pôle-pôle	98
Figure 44 : Interprétation des cartes de résistivités électriques : les anomalies dessinent très nettement le plan de l'église abbatiale et révèlent les indices du complexe au sud.	99
Figure 45 : Carte de localisation du site d'Obernai (source IGN).....	100
Figure 46 : Log stratigraphique du recouvrement lœssique sur le site d'Obernai (cliché A. Ferrier) 101	
Figure 47 : Carte topographique de la surface de décapage. A l'Ouest la surface est légèrement plus élevée, indépendamment des structures découvertes. (fond A. Ferrier).....	103
Figure 48 : Vue des bermes laissées sur le terrain et qui révèlent des variations dans la profondeur du niveau de décapage (cliché A. Ferrier).....	103
Figure 49 : Vue en plan d'une fosse présentant des contrastes assez nets entre le substrat lœssique claire et le comblement plus sombre de la structure (cliché A. Ferrier).....	104

Figure 50 : Carte de susceptibilité magnétique apparente mesurée avec le MS2 (fond A. Ferrier)	105
Figure 51 : Vue générale de la surface décapée où se dessinent nettement les structures archéologiques (cliché A. Ferrier)	105
Figure 52 : Vue en coupe d'une structure fouillée (cliché A. Ferrier)	106
Figure 53 : Carte de localisation du site de Duntzenhem (source IGN) et vue générale du site (Données : Quatre vents)	107
Figure 54 : Vue aérienne de la fouille archéologique : on peut y observer au sud et au nord les loess alors qu'au milieu se concentrent les niveaux argileux des colluvionnements (clichés QuatreVents)	108
Figure 55 : Photographie aérienne du site réalisée lors de l'étude d'impact sur le tracé de la LGV-Est (cliché R. Goguy)	109
Figure 56 : Vue générale de la surface décapée sur le site médiéval. On y observe les nombreuses bermes jalonnant le terrain (cliché F. Reutenauer).....	110
Figure 57 : Carte du pseudo-gradient vertical du champ magnétique terrestre sur le relevé des structures archéologiques : L'association de ces deux couches met en avant la redondance de l'information. On peut observer le prolongement du fossé A invisible sur le terrain. (fond F. Reutenauer)	111
Figure 58 : Carte de susceptibilité magnétique établie sur le relevé topographique de la surface décapée. Aucune corrélation n'est observée entre ces deux types de données ce qui révèle l'indépendance de la susceptibilité par rapport aux variations topographiques.	112
Figure 59 : Carte de susceptibilité magnétique apparente (MS2 de Bartington) (fond F. Reutenauer)	113
Figure 60 : Vue générale de la villa gallo-romaine (cliché QuatreVents).....	114
Figure 61 : Coupe et plan des fondations, seuls vestiges de la villa sur ce site fortement érodé.(clichés A. Bolly).....	115
Figure 62 : Carte de résistivité électrique apparente autour de la villa. On peut observer les différences dans le rendu des cartes causées par l'état des sols lors de la prospection : au nord sur terrain labouré, au sud sur un sol compacté et à l'ouest sur une prairie. Ces traitements associés à des états hydriques variables ont induit d'importantes différences de résistivités (fond F. Reutenauer, A. Bolly)	116
Figure 63 : Vue sur le niveau de démolition découvert sur la fouille et cartographié hors emprise avec la prospection électrique (cliché F. Reutenauer). Ce niveau a également induit des perturbations magnétiques.....	117
Figure 64 : Vue d'un fond de cabane au sud du site médiéval creusé dans le substrat loessique (cliché F. Reutenauer)	118
Figure 65 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre	119
Figure 66 : Carte d'interprétation des cartes de résistivité électrique et du pseudo-gradient magnétique verticale du champ magnétique terrestre.....	120
Figure 67 : Vue en plan des empierrements sur la partie médiévale du site de Duntzenheim (clichés F. Reutenauer)	121
Figure 68 : Carte de localisation du site de Steinbourg (source IGN).....	122
Figure 69 : Vue des différences de recouvrement entre les parties est et ouest du site de Steinbourg : à gauche les niveaux argileux du haut de versant associés à un très faible recouvrement des structures, à droite les niveaux sableux à l'ouest, plus épais (clichés C. Peter).	123
Figure 70 : Carte de résistivité électrique apparente qui présente de forts contrastes dus à la nature géologique du recouvrement	125
Figure 71 : Carte de résistivité électrique apparente après filtrage des données (filtre régional).....	125

Figure 72 : Vue générale des tranchées et du bâtiment rectangulaire et des importants niveaux de colluvionnement qui recouvre les empièvements médiévaux (clichés C. Peter).....	126
Figure 73 : Carte des anomalies du pseudo-gradient vertical du champ magnétique terrestre. On remarquera l'absence du bâtiment carré à l'inverse des nombreux drains découverts ensuite lors des sondages.	127
Figure 74 : Vue des drains empièrés ou/et fossoyés (clichés C. Peter).....	128
Figure 75 : Carte d'interprétation des données géophysiques sur le site de Steinbourg (fond F. Reutenauer)	129
Figure 76 : Carte de localisation du site de Bernolsheim (source IGN) et vue générale du site en cours de fouille et d'aménagement (clichés QuatreVents).....	130
Figure 77 : Carte de répartition des fenêtres de fouilles sur l'emprise du projet de PDA de Brumath et Environs (Fleischer <i>et al.</i> 2011)	131
Figure 78 : Vue des sépultures découvertes au centre des enclos reconnus par la géophysique et qui avait échappés au diagnostic archéologique (clichés F. Fleischer)	132
Figure 79 : Vue de l'enclos funéraire reconnu en géophysique, on remarque l'importante profondeur des structures fossoyées (clichés F. Fleischer).....	133
Figure 80 : Vue générale de la maison Grossgartach découvert sur la fenêtre 2 de la fouille, la faible profondeur du fossé explique son absence sur la carte d'anomalies magnétiques. L'angle du bâtiment non conservé semble a priori correspondre à une anomalie magnétique légère, peut-être associée à un fantôme magnétique (clichés F. Fleischer).....	135
Figure 81 : Vue d'un probable chablis découvert sur la fenêtre 2 (cliché F. Fleischer).....	136
Figure 82 : Carte de l'intensité totale du champ magnétique terrestre. On y distingue les limites des ensembles géomorphologiques majeurs (fond F. Fleischer).	137
Figure 83 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre, les grandes anomalies y sont estompés et les petites mises en exergue par cette configuration de mesure.(fond F. Fleischer).....	138
Figure 84 : Confrontation des données de prospections magnétiques et des résultats de la fouille de la fenêtre 2, de nombreuses structures concordent entre observations de terrain et prospection magnétique. Certaines structures de trop petites tailles n'apparaissent pas sur les cartes, alors que certaines anomalies ne semblent pas avoir été perçues lors de la fouille (fond F. Fleischer)	139
Figure 85 : Carte de susceptibilité magnétique de la structure 3212 et vue en cours de fouille (cliché C. Leprovost)	140
Figure 86 : Carte de susceptibilité magnétique de la structure 3096 et vue en cours de fouille (cliché C. Leprovost)	141
Figure 87 : Carte de susceptibilité magnétique de la structure 3099 et 3100 et vue en cours de fouille (cliché C. Leprovost).....	141
Figure 88 : Carte de susceptibilité magnétique de la structure 3022 et vue en cours de fouille (cliché C. Leprovost)	142
Figure 89 : Carte de localisation des différentes prospections sur la commune de Sainte-Croix-en-Plaine (source IGN). Celles-ci se concentrent essentiellement autour de la zone industrielle Nord... 143	
Figure 90 : Carte des indices de sites protohistoriques connus par prospections aériennes, diagnostics et fouille archéologiques (Ferrier 2009).....	144
Figure 91 : Carte géologique de Sainte-Croix-en-Plaine (source BRGM), l'ensemble de la commune est recouvert par des alluvions récentes Holocènes (Ferrier 2009).....	145

Figure 92 : Sondages électriques verticaux réalisés sur la commune de Sainte-Croix-en-Plaine, les modèles proposées pour l'inversion des données sont quasi-similaire quelque soit l'emplacement du sondage. Seul varie la hauteur du toit de la nappe phréatique. (clichés M. Landolt).....	146
Figure 93 : Enclos circulaire révélés par photographie aérienne au lieu-dit Jebesen Boden (clichés Jean-Jacques Wolf).....	147
Figure 94 : Relevés des sondages de diagnostic et interprétation des vestiges retrouvés dans les tranchées (d'après Geogon 1997, Kuhnle 1999 et Jeudy 1999).....	148
Figure 95 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre sur le lieu-dit <i>Jebesen Boden</i>	149
Figure 96 : Confrontation entre les interprétations et extrapolation des résultats archéologiques et les cartes d'anomalies magnétiques qui remettent en question l'interprétation des fossés comme enclos circulaires (fond G. Kuhnle 1999, C. Geogon 1997).....	150
Figure 97 : Carte de conductivité électrique apparente, CS60, configuration VCP, sur le double fossé au lieu-dit <i>Jebesen Boden</i>	153
Figure 98 : Carte de susceptibilité magnétique apparente, CS60, configuration VCP, sur le double fossé au lieu-dit <i>Jebesen Boden</i>	153
Figure 99 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre et pseudo-section électrique de résistivité sur le système de double fossé au lieu-dit <i>Jebesen Boden</i>	154
Figure 100 : Carte de conductivité électrique apparente, EM31 – HCP, et pseudo-section électrique sur le principal chenal au lieu-dit <i>Jebesen Boden</i>	156
Figure 101 : Interprétation conjointe des données de prospections électriques et des données archéologiques sur le développement de la nécropole de <i>Jebesen Boden</i>	158
Figure 102 : Carte des anomalies du champ magnétique terrestre (-3/3 nT/m) et interprétation archéologique de l'extension de la nécropole <i>Oberes Holzackerfeld</i> (d'après C. Véber 2006).....	160
Figure 103 : Interprétation conjointe des anomalies de topographies et des indices de sites de photographies aériennes. Sur l'image Google Earth on devine la formation de chenaux dus aux écoulements préférentiels lors du retrait des eaux d'inondations (traitement LIDAR et redressement photo : F. Basoge).....	163
Figure 104 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre au sud de la fouille du <i>Holzackerfeld</i> (fond M. Landolt).....	164
Figure 105 : Interprétation des anomalies du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre au sud de la fouille du <i>Holzackerfeld</i> (fond M. Landolt).....	165
Figure 106 : Carte du pseudo-gradient magnétique vertical au sud du diagnostic <i>Allmend Poste et raccordement électrique</i> et interprétation des anomalies magnétiques (fond A. Ferrier).....	166
Figure 107 : Carte de localisation de l'étude d'Ensisheim (source IGN).....	167
Figure 108 : Données micro-topographiques LIDAR avec les interprétations structurelles géomorphologiques (Données : Service de crues du Haut-Rhin, traitement des données F. Basoge). Les creusements superficiels sur la terrasse sont le produit des écoulements préférentiels des eaux d'inondations alors que dans le lit majeur les creusements sont dus aux paléochenaux.....	168
Figure 109 : Vue de l'enclos circulaire détecté comme anomalie magnétique par la méthode magnétique (cliché A. Ferrier).....	170
Figure 110 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre, résultats des sondages systématiques et interprétation géophysique des cartes (fond A. Ferrier).....	171
Figure 111 : Vue des fosses de sépultures du premier Moyen-âge. Au premier plan une fosse qui a été détectée, au fond de la tranchée une autre fosse de même taille non détectée en géophysique (cliché A. Ferrier).....	172

Figure 112 : Distinction des structures archéologiques découvertes en diagnostic détectée et non détectée. Il s'agit essentiellement de très petites structures ou de fosses de sépultures médiévales (fond A. Ferrier).....	173
Figure 113 : Carte du pseudo-gradient vertical du champ magnétique terrestre superposée aux structures découvertes dans les tranchées de diagnostic (fond A. Ferrier).....	174
Figure 114 : Carte d'interprétation des anomalies du champ magnétique terrestre superposée aux tranchées de diagnostic (fond A. Ferrier).....	174
Figure 115 : Carte d'interprétation des anomalies magnétiques superposée aux structures découvertes dans les tranchées de diagnostic (fond A. Ferrier).....	176
Figure 116 : Vue du fossé à 60 cm de profondeur dans la tranchée 34 (cliché A. Ferrier).....	177
Figure 117 : Structure de la tranchée 34 à 70 cm de profondeur, présentant un très faible niveau de conservation (cliché A. Ferrier).....	177
Figure 118 : Diagraphie de susceptibilité magnétique au bord de la tranchée 34 (carottage à la tarière à main puis mesures avec le MS2-H de Bartington).....	178
Figure 119 : Vue des structures à 70 cm et 1,1 m de profondeur dans la tranchée 34 (clichés A. Ferrier).....	178
Figure 120 : Vue des structures indéterminée, mises en exergue par la géophysique (cliché A. Ferrier).....	179
Figure 121 : Superposition de l'interprétation des anomalies géophysiques et des résultats du diagnostic archéologique (fond A. Ferrier).....	180
Figure 122 : Vue du comblement du chenal (cliché A. Ferrier).....	181
Figure 123 : Vue du niveau archéologique de la Tène Finale (cliché A. Ferrier).....	181
Figure 124 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre sur le projet de ZAID d'Ensisheim (fond A. Ferrier).....	182
Figure 125 : Interprétation des anomalies magnétiques sur le projet de ZAID d'Ensisheim (fond A. Ferrier).....	183
Figure 126 : Carte de localisation du diagnostic de Houssen – <i>Ostheimerweg</i> – (source IGN).....	184
Figure 127 : Log stratigraphique du site de Houssen, 6 phases de dépôts se succèdent et révèlent un enregistrement sédimentaire et archéologique complexe (Bonvalot 2011).....	185
Figure 128 : Vue d'une des tranchées et qui présente de nombreuses structures (cliché F. Bonvalot).....	186
Figure 129 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre superposée aux résultats du diagnostic archéologique (fond F. Bonvalot).....	187
Figure 130 : Carte de localisation du site de Roeschwoog – <i>Am Wasserturm</i> – (source IGN).....	188
Figure 131 : Vue des sépultures avant et en cours de fouille. Sur la droite le terrain présente de nombreux palier de décapage. Sur ces sépultures le comblement de la fosse a pu être assez bien observé (clichés A. Koziol).....	190
Figure 132 : Vue d'une sépulture avant et en cours de fouille. Les différences observées entre la structure avant et après fouille rend compte des incertitudes quant à la reconnaissance des limites de la structure (clichés A. Koziol).....	190
Figure 133 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre. Le très faible signal des structures nécessite de resserrer l'échelle au maximum ce qui induit un aspect bruité des données.....	191
Figure 134 : Carte d'interprétation des anomalies géophysiques associée au relevé des structures fouillées (DAO : A. Koziol, F.-X. Simon).....	192

Figure 135 : Comparaison entre la carte du pseudo-gradient magnétique et les structures découvertes à la fouille, par le biais de la géophysique et les anomalies non reconnues (DAO A. Koziol, F.-X. Simon).....	194
Figure 136 : Vue de deux structures excavées : à gauche le comblement de la structure est identique au substrat gravelo-limoneux alors qu'à droite le comblement plus foncé se distingue du substrat (clichés A. Koziol).....	194
Figure 137 : Vue générale de la fouille et du bâtiment III découvert partiellement par la méthode magnétique (cliché A. Koziol)	195
Figure 138 : Vue de deux fonds de cabane : à gauche des éléments rubéfiés massif ont pu généré un signal magnétique fort. A droite les trous de poteau au fond de la structure ont été mis en évidence avec de l'eau pour augmenter les contrastes, ce qui induit une certaine subjectivité quant à la reconnaissance de ces formes (clichés A. Koziol).	195
Figure 139 : Carte des valeurs de susceptibilité magnétique volumique basse et haute fréquence (MS2B), calcul de la dépendance fréquentielle de la susceptibilité de l'échantillon et estimation de la viscosité magnétique : en bas la localisation des différents échantillons sur la fouille (fond A. Koziol)	197
Figure 140 : Viscosité magnétique volumique en fonction de la susceptibilité magnétique volumique. Les échantillons présentent deux tendances du rapport à 5 et 9 % révélant probablement une pollution métallique pour l'occupation la plus tardive en accord avec les observations de fouilles.	198
Figure 141 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre sur la surface décapée avec un écartement entre profil de 50 cm et à la surface avec un écartement entre profil de 1 m.	199
Figure 142 : a. Carte des anomalies du champ magnétique terrestre sur la zone test, b. Carte de la susceptibilité magnétique apparente (MS2D), c. Carte de la susceptibilité magnétique apparente (CS60 mode VCP), d. Carte de la susceptibilité magnétique apparente (CS60, mode VVCP).....	201
Figure 143 : a. Carte de la viscosité magnétique apparente (VC100 au temps de coupure 24 μ s), b. Calcul du paramètre n de décroissance (suivant la forme $A^{1/n}$) de la viscosité magnétique en fonction du temps c. Carte de la résistivité électrique apparente (CS60 mode VCP).....	202
Figure 144 : Carte de localisation du diagnostic de Horbourg-Wihr – <i>Kreuzfeld 2</i> – en contexte péri-urbain (source IGN).....	204
Figure 145 : Vue d'une sole et d'un empierrement à proximité de la voie à Horbourg-Wihr (clichés S. Chauvin).....	206
Figure 146 : Comparaison des résultats entre à droite, la carte d'anomalie de l'intensité totale du champ magnétique terrestre et à gauche la carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre. Les anomalies ne sont clairement visibles que sur la première carte.....	207
Figure 147 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre sur <i>Kreuzfeld 2</i> avec le plan de la fouille <i>Kreuzfeld 1</i> voisine au sud qui révèle les organisations principales que l'on retrouve au nord avec les anomalies géophysiques (fond P. Flotté).....	208
Figure 148 : Carte d'interprétation des anomalies magnétiques sur le diagnostic de <i>Kreuzfeld</i> superposées aux tranchées de diagnostic et aux résultats archéologiques avec au sud les résultats du premier diagnostic qui n'avait permis de repérer que la voie principale et quelques alignements. (fond F. Burg et S. Chauvin).....	210
Figure 149 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre au nord (PAIR, magnétomètre champ total, 1 m entre profil) avec les résultats de la prospection magnétique PZP, (gradiomètre fluxgate, 0.5 m entre profil) sur surface décapée sur la fouille de <i>Kreuzfeld 1</i>	211
Figure 150 : Carte de localisation des différentes opérations archéologiques : diagnostic de la tranche 1, de la tranche 2 et prospections magnétique et électrique (source IGN)	212

Figure 151 : Vue d'un profil de podzols avec au milieu les niveaux de sables lessivés claires (clichés F. Bonvalot).....	213
Figure 152 : Vue des trous de poteaux découverts lors des tranchées de sondages systématiques. Le comblement argileux des structures ne présente pas de différence de contraste avec le substrat argileux.(clichés F. Bonvalot)	214
Figure 153 : Prospection magnétique au lieu-dit <i>Willmstein</i> , par PZP, avec un gradiomètre fluxgate et un espacement entre profil de 50 cm. Au sud une parcelle se détache du reste du terrain par le niveau de bruit très important qu'il présente. Ce niveau de bruit rappelle le niveau de bruit observé sur la prospection (Posselt und Zickraf Prospektion).....	216
Figure 154 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre. Le niveau de bruit de ce terrain est très fort et probablement causé par de nombreuses pollutions en fer liées à des pratiques agricoles. Ce bruit empêche la détection de toute structure archéologique (d'après F. Bonvalot).....	217
Figure 155 : Carte de résistivité électrique apparente pour un écartement d'électrode de 50 cm en configuration twin probes. Les fossés ne sont repérés que deux fois au lieu de six (clichés F. Bonvalot, DAO F. Bonvalot).....	218
Figure 156 : Carte de localisation de l'opération de Soultz Haut-Rhin – <i>Florival</i> -(source IGN)	219
Figure 157 : Log stratigraphique des niveaux de recouvrement limoneux et lœssiques (T. Vigreux) 220	
Figure 158 : Carte du pseudo-gradient vertical du champ magnétique terrestre superposé aux tranchées du diagnostic, visible sur les cartes de prospections magnétiques (fond C. Peter)	222
Figure 159 : Carte de résistivité électrique apparente, CS60 en mode VCP superposée aux tranchées de diagnostic (fond C. Peter).....	223
Figure 160 : Carte de susceptibilité magnétique apparente, CS60 en mode VCP superposée au plan des tranchées de diagnostic (fond C. Peter).....	224
Figure 161 : Carte d'interprétation des anomalies géophysiques hors emprise (fond T. Logel).....	225
Figure 162 : Carte du pseudo-gradient vertical de l'intensité du champ magnétique terrestre sur la surface décapée.....	226
Figure 163 : Interprétation des anomalies magnétiques sur la surface décapée superposée aux observations de la fouille archéologique (fond T. Logel)	226
Figure 164 : Confrontation des données carpologiques et des données géophysiques. Le trou de poteau 57, le plus richement doté parmi ceux testé en tamisage semble associé à une anomalie géophysique difficilement interprétable (fond C. Schaal, T. Logel)	227
Figure 165 : Vue de l'amas de céramique 42 (à gauche) probablement associée à la fosse 33 (à droite) bien que sur le terrain aucun comblement n'a pu être identifié. Seule l'information géophysique donne du sens à cet amas (clichés T. Logel).....	228
Figure 166 : Alors que le diagnostic ne révèle clairement que les secteurs denses en vestiges les abords du site sont mal appréhendés ; la fouille se concentre sur ces secteurs à l'intérieur de la surface aménagée alors que le site s'inscrit dans un territoire que la seule opération prescrite ne peut caractériser.....	235
Figure 167 : Photographie aérienne de la villa de Duntzenheim avec superposition approximative du tracé LGV (Schneikert 2007)	240
Figure 168 : Différents aspects des structures. La structure 1 a été érodée puis recouverte par un niveau de sol dans lequel s'est développée la terre végétale. La structure 2 est en partie creusée dans le substrat mais sa partie supérieure est en place dans un niveau qui ne la différencie pas. La structure 3 est totalement invisible. La structure 4 est comblée par des éléments archéologiques qui lui confèrent une couleur particulière. Enfin la structure 5 se détache du substrat avec des contrastes nets qui s'accroissent en profondeur.	243

Figure 169 : Délimitation à partir des données de prospections magnétiques de secteurs présentant des propriétés magnétiques différenciables associées à des activités ou des aires dédiées (habitat, etc.) (cliché S. Chauvin).....	249
Figure 170 : Schéma récapitulatif de la gradation de la valeur de l'anomalie géophysique en fonction des corrélations spatiales, physiques ou matérielles.....	252
Figure 171 : Schéma présentant un état hypothétique de conservation à Sultz en brun et le niveau d'apparition des vestiges en noir. Les différences observées pourraient provenir de l'existence de structures dans les niveaux superficielles peu différenciés et lessivés (d'où les niveaux blanchâtre sur la photo présentant la coupe de la fosse latérale nord au cours du diagnostic) (cliché C. Peter).	254
Figure 172 : Le diagnostic des ensembles funéraires : Sont présentés ici deux cas de figures, en haut un cas défavorable où le diagnostic n'est pas en mesure de repérer les sépultures isolées dispersées entre les tranchées. En bas un cas positifs, les sépultures sont réparties selon de fortes densités et des orientations préférentielles (Delattre 2007).....	259
Figure 173 : Combinaison des résultats de prospection électrique et des sondages archéologiques sur le site médiéval de Bernardvillé. Les sépultures prennent place au nord de l'église, dont le plan n'a été révélé que par la géophysique (fond F. Reutenauer).....	261
Figure 174 : Implantation de tranchées de diagnostic en quinconce sur le site de Scherwiller (clichés PAIR)	268
Figure 175 : Deux cas de figures de péjoration des conditions météorologiques ayant pu avoir une incidence sur l'observation des vestiges (clichés F. Bonvalot).....	270
Figure 176 : Schéma récapitulatif de l'intérêt d'associer les tranchées de sondages systématiques à la prospection géophysique dans le but de réduire l'aléa relatif à des découvertes fortuites en cours de fouille. Chaque méthode comble des lacunes de l'autre afin d'optimiser le protocole et la méthode d'investigation.....	276
Figure 177 : Comparaison du plan de la villa fouillée, du plan suggéré par les résultats du diagnostic (d'après Schneikert 2007) et du plan où résultats du diagnostic et photo-interprétation sont associées. Alors que les sondages ont permis de repérer des murs, les photographies aériennes révèlent des ensembles structurés.....	279
Figure 178 : Comparaison entre l'apport des prospections et les résultats des sondages de diagnostic et de fouille. Les plans montrent clairement que le diagnostic a permis de repérer de nombreux vestiges non détectés par les études préalables (prospections pédestres et aériennes). Ces deux méthodes ne répondent pas aux mêmes objectifs (à droite Achard-Corompt et Riquier 2006, Jacques et Prilaux 2006).....	281
Figure 179 : Le schéma actuel. Le plan local d'urbanisme configure les projets. Celui-ci est soumis à prescription (suivant sa superficie ou son intérêt archéologique). Celle-ci entraîne alors la mise en œuvre de l'archéologie préventive qui vient réalimenter la carte archéologique. Dans ce schéma la principale limite est que la connaissance du patrimoine archéologique n'a aucune incidence sur les politiques d'aménagements. Il n'y a donc d'autres alternatives que la sauvegarde des sites par l'étude.....	286
Figure 180 : Dans le nouveau schéma proposé la carte archéologique alors précisée est utilisée directement dans les politiques d'aménagements. Elle permet alors d'une part de contrôler l'aléa archéologique sans affecter la viabilité de ces projets, et d'autre part de préserver des sites archéologiques remarquables qui nécessiteraient des fouilles trop conséquentes pour être supportées par le projet d'aménagement. Les méthodes de prospections viennent alors alimenter une archéologie des grandes surfaces (toujours en milieu rural) et sont complémentaires à la technique traditionnelle de l'archéologie préventive qui reste de mise.....	287