



HAL
open science

Reconstitution paléogéographique et prospection archéologique en zone littorale par approches géophysiques multi-méthodes et multi-échelles

Guillaume Bruniaux

► **To cite this version:**

Guillaume Bruniaux. Reconstitution paléogéographique et prospection archéologique en zone littorale par approches géophysiques multi-méthodes et multi-échelles. Sciences de la Terre. Université de La Rochelle, 2017. Français. NNT : 2017LAROS026 . tel-01804962

HAL Id: tel-01804962

<https://theses.hal.science/tel-01804962v1>

Submitted on 1 Jun 2018

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

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



UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE

ÉCOLE DOCTORALE
Gay Lussac

Laboratoire LIENSs – UMR 7266

THÈSE

présentée par :

Guillaume BRUNIAUX

soutenue le 07 Décembre 2017

pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université de La Rochelle

Discipline : Sciences de la Terre

Spécialité : Terre solide et enveloppes superficielles

Reconstitution paléogéographique et prospection archéologique en zone littorale par approches géophysiques multi-méthodes et multi-échelles

JURY :

Colette SIRIEIX
Corinne SANCHEZ

Professeur, Université de Bordeaux, Examineur
Chargée de Recherche CNRS, Université Paul Valéry Montpellier 3,
Examineur

Jean-Michel CAROZZA
Vivien MATHÉ
François LÉVÊQUE
Nicolas FLORSCH
Marc MUNSCHY
François GILIGNY

Professeur, Université de La Rochelle, Président du jury
Maître de Conférences, Université de La Rochelle, Directeur de thèse
Maître de Conférences, Université de La Rochelle, Examineur
Professeur, Université Pierre et Marie Curie, Examineur
Physicien des Observatoires, Université Strasbourg, Rapporteur
Professeur, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Rapporteur

« Fais-le, ou ne le fais pas, mais il n'y a pas d'essai », Maître Yoda

Remerciements

Cette thèse a débuté en octobre 2014 et s'est terminée le 7 décembre 2017, jour de la soutenance. La thèse s'est déroulée au sein de l'équipe de recherche *ESTRAN* de l'UMR 7266 *Litoral, ENvironnement et Sociétés* de l'Université de la Rochelle. Elle a été financée par une bourse du Ministère de la Culture et soutenu financièrement par le Service Régional de l'Archéologie de la DRAC Poitou-Charentes.

Je tiens particulièrement à remercier *Vivien Mathé*, mon directeur de thèse et géophysicien appliquée à l'archéologie, qui m'a encadré pendant ces trois années. J'ai débuté ce travail de recherche avec très peu de connaissance en géophysique, voire aucune en prospection géophysique appliquée à l'archéologique. Si j'ai pu arriver au bout de ce travail de longue haleine, c'est en grande partie grâce à sa grande pédagogie et sa patience.

Je remercie aussi le grand pédagogue *François Lévêque* (dit le « moustachu »), magnéticien mais pas magnétiseur, directeur de l'équipe *ESTRAN*. Toujours de bon conseil et avec un sens critique très aiguisé et pertinent.

Un grand remerciement aux deux archéologues, *Corinne Sanchez* (UMR ASM, Montpellier) et *Vincent Ard* (UMR TRACES, Toulouse), avec qui j'ai travaillé et collaboré pendant ces trois années.

À *Corinne Sanchez* : les journées de terrain à Narbonne ont été intenses mais le retour à la Nautique a toujours été un plaisir (vive la bière !), mêmes si les moustiques ne sont pas de bons compagnons. J'espère pouvoir poursuivre les investigations engagées depuis 2015 et aboutir à la découverte du cours antique de l'Aude. D'ailleurs, nous avons beau cherché autour de la Robine, nous n'avons toujours pas trouvé la Batcave.

À *Vincent Ard* : les enceintes néolithiques sont des sites vraiment intéressant à étudier et à prospecter. Je suis, de ce fait, heureux de pouvoir poursuivre ces travaux en intégrant pendant quelques temps l'ANR MONUMEN. Il y aura, d'ailleurs, de quoi faire.

Un grand merci à *Adrien Camus*, géophysicien et collègue de bureau, pour ses conseils et son aide sur le terrain. Il m'a accompagné dans les colloques et les missions à Narbonne et au Pontet dans la joie et la bonne humeur.

Merci à *Carole Romey* pour le travail qu'elle a effectué durant ses deux années d'ATER au LIENSs. J'ai très apprécié de travailler avec toi et je te remercie pour les travaux que tu as réalisés sur l'aspect paléoenvironnement du site du Pontet.

Je remercie de même *Clément Flaux* qui a été le géomorphologue avec qui j'ai pu travailler à collaborer durant la campagne de carottage à Narbonne. Merci pour le travail d'expertise et d'analyse que tu as effectuée.

Je n'oublie pas *Camille Fäisse*, doctorante en géoarchéologie, qui m'a accompagnée pendant une semaine à Narbonne. Une semaine de prospection électrique acharnée !

Merci à *Laurent Carozza* et *Albane Burens* (Université de Toulouse) pour les carottages effectués et le prêt du carottier sur le site du Pontet. Merci à *Pierre Stéphan* (Université de Bretagne Occidentale) pour le prêt du carottier et la disponibilité du granulomètre laser.

Merci à mes collègues du LIENSs pour leur soutien : *Elisabeth Prouteau*, *Dominique Proust*, *Marie Chivail* et plein d'autres...

J'ai une très grande pensée pour *Murielle Meurisse-Fort*, géoarchéologue au Centre départemental d'archéologie du Pas-de-Calais, qui m'a fait avancer dans mon projet professionnel grâce aux stages de Licence 3 et Master 2 où elle m'a encadré. Je remercie aussi *Alain Trentesaux*, mon encadrant de stage de Master 1, qui m'a fait aussi avancer mon projet.

Je remercie toute ma famille pour leur soutien (Papy-Mamy, mes oncles et mes tantes, mes cousins et mes cousines) et notamment mon père, *Pascal Bruniaux*, et ma mère, *Nadine Darras*, qui m'ont poussé à franchir le cap et à prendre la décision de m'engager dans cette thèse. Une grande pensée particulière à mon frère *Robin Bruniaux* et à ma cousine *Hortense Crépin*.

Je remercie ma copine *Adeline Lagneau* qui m'a accompagné dans cette aventure même si parfois elle pensait que je n'y arriverai pas.

Je remercie mes amies fidèles, *Louis Battist*, *Aurélien Poirier*, *Clémentine Colpaert* et *Gaëtan Labbe* que je trouvais pendant les vacances de Noël, trop peu à mon goût. Une pensée sibérienne pour *Clémentine Colpaert* qui réalise sa thèse à Novossibirsk (Sibérie).

Je pense aussi à ceux que je n'ai pas remerciés et je m'en excuse auprès d'eux. Cela ne veut pas dire que vous ai oublié...

Sommaire

CHAPITRE I : INTRODUCTION	21
1 PROSPECTION GÉOPHYSIQUE DU SITE ARCHÉOLOGIQUE	24
1.1 BREF HISTORIQUE	24
1.2 ÉVOLUTION DE L'INSTRUMENTATION ET DES PRATIQUES	25
1.3 INTERACTION DISCIPLINAIRE ET TRAVAUX COMMUNS	26
1.4 PROBLÉMATIQUE ET TRAVAUX DE THÈSE	27
2 APPROCHE GÉOPHYSIQUE DE LA PALÉOGÉOGRAPHIE DU SITE	29
2.1 GÉOPHYSIQUE ET APPROCHE PALÉOGÉOGRAPHIE : ÉTAT DE L'ART	29
2.2 PROBLÉMATIQUE ET TRAVAUX DE THÈSE	30
CHAPITRE II : PRÉSENTATION DES ZONES D'ÉTUDES	33
1 LE SITE NÉOLITHIQUE DU PONTET : MARAIS DE ROCHEFORT	35
1.1 CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE ET GÉOLOGIQUE	35
1.1.1 Formations sédimentaires ante-holocènes et tectonique régionale	35
1.1.2 Formations sédimentaires holocènes	39
1.2 CONTEXTE ARCHÉOLOGIQUE : EXPLOITATION DU SEL	39
1.3 LE SITE NÉOLITHIQUE DE LA GARENNE (SAINT-HIPPOLYTE)	40
2 LES PORTS ANTIQUES DE NARBONNE	42
2.1 CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE	42
2.2 CONTEXTE ARCHÉOLOGIQUE	44
CHAPITRE III : MATÉRIELS, MÉTHODES ET PROTOCOLES UTILISÉS	47
1 LA PROSPECTION ÉLECTRIQUE	49
1.1 DÉFINITION DE LA RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE	49
1.2 LES PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES DU SOL	49
1.2.1 La Loi d'Archie : relation entre résistivité, porosité et teneur en eau	50
1.2.2 La température	51
1.3 PRINCIPE DE LA MESURE DE LA RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE	52
1.3.1 Circulation du courant électrique dans un milieu homogène	52
1.3.2 Circulation du courant électrique par une boucle de courant dans un demi-espace : le quadripôle	52
1.3.3 Cas des milieux non-homogènes : la résistivité électrique apparente	53
1.4 LES QUADRIPOLES UTILISÉS : GÉOMÉTRIE, SENSIBILITÉ ET PROFONDEUR D'INVESTIGATION	54
1.5 LA CARTOGRAPHIE DE LA RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE APPARENTE	56
1.6 LA SECTION DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE	57
1.6.1 Acquisition des mesures	57
1.6.2 Archéologie et géomorphologie : choix du quadripôle	60
1.6.3 Inversion des données de résistivité électrique	62
1.7 LA DIAGRAPHIE ÉLECTRIQUE	63
1.8 ERREURS SUR LA RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE APPARENTE MESURÉE	64
2 LA PROSPECTION MAGNÉTIQUE	66
2.1 GÉNÉRALITÉS	66
2.1.1 Principes fondamentaux	66
2.1.2 Les comportements magnétiques	68
2.1.3 Les aimantations rémanentes	69
2.2 LES PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DU SOL	70
2.3 THÉORIE DU POTENTIEL MAGNÉTIQUE ET SES APPLICATIONS	71
2.3.1 Le potentiel magnétique	71
2.3.2 Applications de la théorie du potentiel à la prospection magnétique	72
2.3.3 Opérateurs de transformation de la carte magnétique	73
2.4 MATÉRIELS ET PROTOCOLES UTILISÉS	73
2.4.1 Protocole standard	74

2.4.1.1	<i>Gradiomètre à capteurs de type fluxgate</i>	74
2.4.1.2	<i>Mesure du champ magnétique total</i>	75
2.4.2	<i>Protocole par positionnement DGPS</i>	75
2.4.3	<i>Protocole à haute résolution et haute précision de positionnement</i>	76
2.4.4	<i>Mesure de la susceptibilité magnétique</i>	77
3	LA PROSPECTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE PAR MÉTHODE SLINGRAM	78
3.1	PRINCIPES GÉNÉRAUX.....	79
3.2	PROFONDEUR DE PEAU, APPROXIMATION DU LIN ET SENSIBILITÉ.....	80
3.3	CONDUCTIVIMÈTRES UTILISÉS ET PROTOCOLE.....	83
3.4	INFLUENCE ET ERREUR SUR LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE APPARENTE MESURÉE.....	83
3.4.1	<i>Erreur intrinsèque au conductivimètre et au protocole</i>	84
3.4.2	<i>Influence des milieux hyper-conducteurs</i>	84
4	ESSAI PÉNÉTROMÉTRIQUE	86
5	PHOTOGRAPHIE ET PHOTOGRAMMÉTRIE	89
5.1	PRINCIPE DE LA PHOTOGRAMMÉTRIE.....	89
5.2	MATÉRIELS ET PROTOCOLE.....	89
5.3	ORTHOPHOTOGRAPHIES ET MODÈLES NUMÉRIQUES DE SURFACE.....	90

CHAPITRE IV : DÉVELOPPEMENT MÉTHODOLOGIQUE A L'ÉCHELLE D'UN SITE ARCHÉOLOGIQUE 93

1	PROSPECTION MAGNÉTIQUE À HAUTE RÉOLUTION ET HAUTE PRÉCISION DE POSITIONNEMENT	95
1.1	DATA PROCESSING CHAIN TO HIGH SPATIAL RESOLUTION MAGNETIC SURVEY.....	96
	INTRODUCTION.....	98
	PRESENTATION OF THE SITE.....	99
	DEVICES AND DATA ACQUISITION PROTOCOL.....	100
	RESULTS AND DATA PROCESSING.....	101
A.	PROCESSING OF POSITIONAL DATA.....	102
1.	Time errors.....	102
2.	Incorrect positions.....	103
B.	PROCESSING OF MAGNETIC DATA.....	104
1.	The mobile dataset.....	104
2.	The base dataset.....	106
C.	PROCESSING OF MERGED DATA.....	106
1.	The standard processing.....	106
2.	The site specific processing.....	108
	Correction of positions in the bend.....	108
	Removal of magnetic disturbance due to traffic.....	108
	Correction of magnetic anomalies near to electricity pole and residential area.....	109
	Correction of line shifts linked to soil tillage.....	109
D.	GRIDDING AND GRIDDED MAGNETIC DATA PROCESSING.....	110
1.	Correction linked to topography and to relative height variation of the sensors.....	110
2.	The reduction to the pole algorithm.....	114
	SYNTHESIS OF DATA PROCESSING CHAIN.....	114
	CONCLUSIONS AND FUTURE WORKS.....	115
	ACKNOWLEDGMENTS.....	118
	REFERENCES.....	118
1.2	COMPLÉMENTS SUR LA CHAÎNE DE TRAITEMENT DU PROTOCOLE DE PROSPECTION MAGNÉTIQUE.....	120
1.2.1	<i>La synchronisation</i>	120
1.2.2	<i>La zone critique de la station totale</i>	121
1.3	INTERPRÉTATION ET EXTENSION DE LA CARTE MAGNÉTIQUE DU PONTET.....	125
1.3.1	Anomalies magnétiques assimilées à des structures néolithiques.....	125
1.3.2	Anomalies magnétiques d'origine naturelle ou post-néolithiques.....	130
1.3.2.1	<i>La paléo-falaise et la partie basse</i>	130
1.3.2.2	<i>Les diaclases</i>	130
1.3.2.3	<i>Le parcellaire et les anciennes structures bâtis</i>	131
1.3.3	<i>Extension de la carte magnétique du Pontet vers le Nord</i>	132
1.3.4	<i>Conclusions</i>	134

1.4	PROSPECTION MAGNÉTIQUE À HAUTE RÉOLUTION : SITE NÉOLITHIQUE DE LA GARENNE (SAINT-HIPPOLYTE, CHARENTE-MARITIME).....	135
1.4.1	<i>Présentation du site</i>	135
1.4.2	<i>Méthodes et comparaison de protocoles</i>	136
1.4.3	<i>Apports des prospections magnétiques à la connaissance du site</i>	138
1.4.4	<i>Approche préliminaire de la géomorphologie du site</i>	139
1.4.5	<i>Interprétations croisées des prospections géophysiques</i>	143
1.5	CONCLUSIONS.....	144
2	APPROCHES MULTI-MÉTHODES ET MULTI-ÉCHELLES DU SITE NÉOLITHIQUE DU PONTET	145
2.1	ESTIMATION DU POTENTIEL DE CONSERVATION D'UN NIVEAU ARCHÉOLOGIQUE NÉOLITHIQUE DANS UNE ENCEINTE FOSSOYÉE IMPLANTÉE SUR UN PLATEAU CALCAIRE	148
1	INTRODUCTION	152
2	LE SITE NÉOLITHIQUE DU PONTET : ÉTAT DES CONNAISSANCES.....	154
3	MATÉRIELS ET MÉTHODES COMPLÉMENTAIRES.....	157
3.1	ORTHOPHOTOGRAPHIES ET PHOTO-INTERPRÉTATION	157
3.2	PROSPECTION ÉLECTRIQUE : CARTES DE LA RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE APPARENTE	159
3.3	PROSPECTION ÉLECTRIQUE : SECTIONS DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE.....	160
3.4	ESSAIS PÉNÉTRIMÉTRIQUES.....	161
3.5	SONDAGE ARCHÉOLOGIQUE	162
4	DONNÉES COMPLÉMENTAIRES : PROSPECTIONS ÉLECTRIQUE ET SONDAGE ARCHÉOLOGIQUE ..	162
4.1	APPORT DES PROSPECTIONS ÉLECTRIQUES.....	162
4.2	SONDAGE ARCHÉOLOGIQUE : STRATIGRAPHIE ET STRUCTURE MISES AU JOUR	166
5	ESTIMATION DE L'ÉPAISSEUR DE SOL : DÉTERMINATION DU POTENTIEL DE CONSERVATION DU NIVEAU D'OCCUPATION NÉOLITHIQUE	169
5.1	CONFRONTATION ENTRE LE SONDAGE ARCHÉOLOGIQUE ET LA GÉOPHYSIQUE	169
5.2	EXTENSION DES CARTES DE LA RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE APPARENTE À L'ENSEMBLE DU SITE.....	170
5.3	ESTIMATION DE L'ÉPAISSEUR DE SOL RECOUVRANT LE SUBSTRAT	175
5.4	ESTIMATION DU POTENTIEL DE CONSERVATION DU NIVEAU D'OCCUPATION NÉOLITHIQUE.....	179
6	DISCUSSIONS	180
7	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	182
8	REMERCIEMENTS	183
9	BIBLIOGRAPHIE.....	184
2.2	COMPLÉMENTS SUR L'ESTIMATION DU POTENTIEL DE CONSERVATION DU NIVEAU D'OCCUPATION NÉOLITHIQUE ..	188
2.2.1	<i>Le plateau calcaire et la paléo-falaise</i>	188
2.2.2	<i>Les sections de résistivité électrique</i>	193
2.2.2.1	<i>Compléments sur les sections 1, 2 et 3</i>	193
2.2.2.2	<i>Les sections électriques 4, 5 et 6 : fossés de l'enceinte externe</i>	194
2.2.2.3	<i>Sections électriques 4, 5, 6 et 7 : contrôle de l'épaisseur de sol</i>	196
2.2.3	<i>Apports des cartes de résistivité électrique apparente à 1 m</i>	199
2.2.4	<i>Informations complémentaires sur la structure G</i>	202
2.2.5	<i>Carte de la topographie du substrat</i>	203
2.2.6	<i>Conclusions</i>	207
2.3	EXTENSION DE LA CARTE MAGNÉTIQUE DU PONTET VERS LE NORD-EST	208
3	CONCLUSIONS GÉNÉRALES	211

CHAPITRE V : PROSPECTIONS GÉOPHYSIQUES APPLIQUÉES A LA RECONSTITUTION PALÉOGÉOGRAPHIQUE - IMPLANTATION DE CAROTTAGES PALÉOENVIRONNEMENTAUX

1	APPROCHE PALÉOGÉOGRAPHIQUE DU SITE DU PONTET	217
1.1	CARTE DE LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE APPARENTE.....	217
1.2	SECTIONS DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE	220
1.2.1	<i>La partie aval de la vallée</i>	220
1.2.2	<i>La partie centrale de la vallée</i>	226
1.3	IMPLANTATION DES CAROTTAGES.....	230
1.3.1	<i>La partie aval de la vallée</i>	231
1.3.1.1	<i>Apport du pénétrogramme et du profil de diagraphie électrique</i>	232

1.3.1.2	<i>Études paléoenvironnementales et magnétiques des carottes S1 et S2 (par Carole Romey) ...</i>	234
1.3.2	La partie centrale de la vallée.....	237
1.3.2.1	Apports des diagraphies et des pénétrogrammes.....	238
1.3.2.2	Analyses des carottes S3 et S4 (d'après les travaux de Carole Romey).....	239
1.3.2.3	Comparaison entre les carottes et le couplage diagraphie électrique et pénétrométrie.....	241
1.4	SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....	241
1.4.1	Approche paléogéographique du site du Pontet.....	242
1.4.2	Confrontation entre les sections électriques et les carottages	244
1.4.3	Comparaison des configurations des quadripôles.....	246
1.5	CONCLUSIONS.....	248
2	RECHERCHE DU PALÉO-COURS DE L'AUDE (NARBONNE)	249
2.1	RÉSULTATS DES PROSPECTIONS GÉOPHYSIQUES.....	251
2.1.1	La zone du Castélou.....	251
2.1.1.1	<i>La section de référence : la section 1</i>	251
2.1.1.2	<i>La terminaison des deux berges</i>	255
2.1.2	La zone de Mandirac	255
2.1.3	Au nord de Mandirac : le lieu-dit Fringuet	261
2.1.4	Les zones de Craboulette et Craboules, de l'Étang du Cercle et de l'autoroute.....	261
2.1.4.1	<i>Cartes de la conductivité électrique apparente</i>	264
2.1.4.2	<i>Sections de résistivité électrique</i>	264
2.1.5	Zone d'implantation des carottages.....	266
2.1.5.1	<i>Carte de la conductivité apparente</i>	266
2.1.5.2	<i>Carte du signal en phase</i>	268
2.1.5.3	<i>Les sections électriques</i>	271
2.1.6	Conclusions.....	272
2.2	CAROTTAGES DANS LE SECTEUR DE CRABOULETTE, DELTA DE L'AUDE	273
2.3	CONFRONTATION ENTRE LA GÉOPHYSIQUE ET LES CAROTTAGES	276
2.3.1	Les diagraphies de résistivité électrique et les pénétrogrammes	277
2.3.1.1	Carotte CRA-2.....	277
2.3.1.2	Carotte CRA-1 et CRA-10	283
2.3.1.3	Carotte CRA-4.....	284
2.3.1.4	Le transect de carottes et les sections électriques 1 et 5	285
2.3.2	Conclusions et discussions	286

CHAPITRE VI : CONCLUSIONS GÉNÉRALES - PERSPECTIVES _____ 289

1	DÉVELOPPEMENT MÉTHODOLOGIQUE À L'ÉCHELLE D'UN SITE ARCHÉOLOGIQUE.....	291
1.1	SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS	291
1.2	PERSPECTIVES.....	292
1.2.1	Protocole original de prospection magnétique	292
1.2.2	Estimation du potentiel de conservation d'un niveau d'occupation	293
2	PROSPECTIONS GÉOPHYSIQUES APPLIQUÉES À LA RECONSTITUTION PALÉOGÉOGRAPHIQUE 293	293
2.1	SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS	293
2.1.1	Apport de la prospection géophysique : satisfaisant ?.....	294
2.1.2	Apports des diagraphies électriques	295
2.2	PERSPECTIVES	295

BIBLIOGRAPHIE _____ 297

ANNEXES : _____ 315

Annexe 1 : Carottages et analyses associées du site du Pontet (Par Carole Romey) _____ 317

Annexe 2 : Prospections géophysiques sur les zones de l'Étang du Cercle et de l'autoroute (Narbonne) _ 319

1	LA ZONE DE L'ÉTANGS DU CERCLE	319
1.1	LE TRANSECT 2 : SECTIONS 4, 3, 2 ET 5	319
1.2	LE TRANSECT 3 : SECTION 6, 7, 9 ET 10	321
1.2.1	Les cartes de la conductivité électrique apparente.....	323
1.2.2	Les sections de résistivité électrique	323

1.3	CONCLUSIONS.....	328
2	LA ZONE DE L'« AUTOROUTE »	329
2.1	CARTE DE LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE APPARENTE	329
2.2	CARTE DU SIGNAL EN PHASE.....	333
2.3	LES SECTIONS ÉLECTRIQUES.....	333
2.3.1	Les sections électriques 1 et 2.....	333
2.3.2	Les sections électriques 3 et 4.....	334
2.4	CONCLUSIONS.....	335

Annexe 3 : Carottages dans le secteur de Craboulette, delta de l'Aude : où est (sont) le(s) paléo-chenal(aux) de l'Aude ? **337**

1	CONTEXTE	337
2	SITE ET MÉTHODES	338
3	RÉSULTATS	339
3.1	DESCRIPTION BIO-SÉDIMENTOLOGIQUE DE LA SÉQUENCE CRA-2	339
3.1.1	Faciès 1 : sables limoneux gris.....	339
3.1.2	Faciès 2 : vases bleutées.....	340
3.1.3	Faciès 3 : Sables graveleux	340
3.1.4	Faciès 4 : Limons argileux	340
3.1.5	Faciès 5 : Sables grossiers.....	341
3.2	IMAGE CM.....	341
3.3	TENEUR EN PLOMB ET ÉLÉMENTS MAJEURS	342
4	SECTION SÉDIMENTAIRE DES DOUZE CAROTTAGES : DEUX PALÉO-CHENAUX	343
4.1	PHASE 1	343
4.2	PHASE 2	344
4.3	PHASE 3	344
4.4	PHASE 4	345
4.5	PHASE 5	346
4.6	PHASE 6	346
5	CONCLUSION	346
6	REMERCIEMENTS	347
7	RÉFÉRENCES	347

Liste des figures

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DES ZONES D'ETUDE

1 LE SITE NÉOLITHIQUE DU PONTET : MARAIS DE ROCHEFORT

- Figure 1.1 : Localisation des sites du Pontet et de La Garenne. a) À l'échelle départementale. (b) À l'échelle de l'estuaire de la Charente. 36
- Figure 1.2 : Localisation du site du Pontet et de la vallée du Grand Écours sur la carte topographique au 1/25000 (IGN)..... 37
- Figure 1.3 : Carte du relief du marais de Rochefort et de l'estuaire de la Charente. 37
- Figure 1.4 : Extrait de la carte géologique de Rochefort au 1/50000 (Bourgueil et al., 1972). N.B. : les notations des étages des cartes géologiques de la France au 1/50000 ont été modifiées en 1997 (Callec et al., 2006) ; celles employées sont obsolètes et se réfèrent à la notation de 1972. 38
- Figure 1.5 : Évolution schématique de la Charente au cours de l'Holocène (DAO : Quesnel L. ; Laporte et al., 2009). 40
- Figure 1.6 : Extrait de la carte géologique de Rochefort au 1/50000 (Bourgueil et al., 1972). 41

2 LES PORTS ANTIQUES DE NARBONNE

- Figure 2.1 : Cadre géographique de Narbonne (d'après Mathé et al., 2016, DAO : J. Caverio)..... 42
- Figure 2.2 : Cadre géologique général de la région de Narbonne et de l'étang de Bages-Sigean (©Requirand C., (Caverio, 2011)..... 43
- Figure 2.3 : Hypothèses de reconstitution paléogéographique du bassin de l'Aude au cours des derniers millénaires (©Salel T., (Sanchez, 2013)..... 44
- Figure 2.4 : Le paléo-cours sud de l'Aude et les digues romaines. (a) Carte des anomalies de conductivité apparente précisant le paléo-cours de l'Aude (A, B et E) et les deux berges romaines (C et D ; Mathé et al., 2016). (b) photographie de la digue gauche (Sanchez et Jézégou, 2014). 45

CHAPITRE III : MATÉRIELS, MÉTHODES ET PROTOCOLES UTILISÉS

1 LA PROSPECTION ÉLECTRIQUE

- Figure 1.1 : Schéma des géométries de trois quadripôles linéaires. La profondeur effective d'investigation (x) est indiquée pour chaque quadripôle. Elle est positionnée par rapport à l'écartement relatif des électrodes..... 55
- Figure 1.2 : RM15 (Geoscan Research) monté sur son châssis avec les électrodes mobiles d'injection (A) et de potentiel (M). Les deux autres, B et N, sont disposées à l'infini. Sur cette image, l'écartement inter-électrodes est 0,5 m. 57
- Figure 1.3 : Représentation schématique de l'acquisition d'une pseudosection de résistivité électrique apparente. Le quadripôle est le dipôle-dipôle ($n=1$). 58
- Figure 1.4 : Illustration du processus de l'inversion des données de résistivité électrique (Res2Dinv). (a) Pseudosection de résistivité apparente mesurée. (b) Pseudosection de résistivité apparente calculée. (c) Section de résistivité « vraie » ou modèle de résistivité de la subsurface..... 59
- Figure 1.5 : Résistivimètre Terrameter LS (1 ; ABEM) raccordé à 64 électrodes (2) par deux câbles multiprises (3). L'alimentation correspond à une batterie standard de 12 V (4)..... 59
- Figure 1.6 : Représentation de la sensibilité du dispositif dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger pour trois arrangements différents (générée sous Res2Dmod). Les profondeurs sont normalisées en fonction de la longueur totale L du dispositif ($z_n=z/L$) ainsi l'axe horizontale..... 61
- Figure 1.7 : Dispositif de diagraphe. Assemblage de deux électrodes sur le train de tige du pénétromètre PANDA® 2. Les électrodes sont connectées au résistivimètre RM15. 63

Figure 1.8 : Section électrique effectuée dans la salicorne. L'hexamètre (flèches jaunes) épouse la morphologie de la végétation impliquant de possibles erreurs de positionnement des électrodes..... 65

2 LA PROSPECTION MAGNÉTIQUE

Figure 2.1 : Gradiomètre FEREX (Foerster Institut) avec quatre capteurs de type fluxgate montés sur son chariot (©A. Camus). 75

Figure 2.2 : (a) Magnétomètre G-858 (Geometrics) avec deux capteurs à vapeur de césium (1) espacés horizontalement de 0,39 m. Réflecteur à 360° placé entre les capteurs (2). (b) Magnétomètre G-858 disposé en base (3). (c) Station totale robotisée de type S8 (Trimble). 77

Figure 2.3 : Susceptibilitémètre KT-9 (Kappameter) et le GPS différentiel (Spectra Precision). 78

3 LA PROSPECTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE PAR MÉTHODE SLINGRAM

Figure 3.1 : Représentation schématique du principe de la prospection électromagnétique (Chouteau et Giroux, 2008). Le transmetteur génère un champ magnétique qui interagit avec les conducteurs de la subsurface. Le champ primaire induit des courants de Foucault dans ces conducteurs générant un champ magnétique secondaire. Les champs primaire et secondaire sont captés par le récepteur et porte une information sur la conductivité des matériaux traversés par l'onde électromagnétique. 79

Figure 3.2 : Relation entre le champ magnétique primaire (a), le champ électrique secondaire (induced voltage) (b), le courant électrique secondaire (champ secondaire) (c) et le champ magnétique résultant (d) (Reynolds, 1997). 80

Figure 3.3 : (a) Fonction de sensibilité relative pour une fine couche homogène pour des bobines orientées horizontalement (Φ_V) et verticalement (Φ_H). (b) Réponse cumulative pour le VMD (R_V) du champ magnétique secondaire en fonction de la profondeur normalisée (McNeill, 1980b)..... 82

Figure 3.4 : Approximation du LIN de l'EM31-MK2 orienté en VMD (ligne rouge) avec la relation linéaire de la condition LIN théorique (pointillés noirs) : relation entre conductivité électrique (« vraie ») d'un demi-espace avec la conductivité mesurée en VMD par le conductivimètre (d'après (McNeill, 1980b). 85

4 ESSAI PÉNÉTROMÉTRIQUE

Figure 4.1 : Pénétromètre dynamique de type PANDA® 2. Le principe consiste à enfoncer à coups de maillet (1) une tige en acier (2) munie à l'extrémité d'une pointe (3). L'opérateur frappe sur une enclume munie d'un capteur de pression (4) reliée à un dispositif d'acquisition de données (5). 87

Figure 4.2 : Exemple de pénétrogramme. Le lissage à la médiane glissante (courbe rouge) retire le signal haute fréquence et les valeurs aberrantes du pénétrogramme brute (gris). Ce traitement permet de mieux décrypter l'information comme la présence de probables couches lithologiques (flèches noires). .. 88

5 PHOTOGRAPHIE ET PHOTOGRAMMÉTRIE

Figure 5.1 : Drone eBee (Sensefly). Aile volante propulsée par une hélice (© B. Millescamps) 90

Figure 5.2 : Imagerie aérienne par drone. (a) Orthophotographie à 4 cm de résolution spatiale superposée au cadastre napoléonien de 1824 (Archives Départementales de la Charente-Maritime). (b) MNS à 8 cm de résolution spatiale. (c) Orthophotographie à 2 cm de résolution spatiale. (d) MNS à 4 cm de résolution spatiale. 91

CHAPITRE IV : DÉVELOPPEMENT MÉTHODOLOGIQUE À L'ÉCHELLE D'UN SITE ARCHÉOLOGIQUE

1 PROSPECTION MAGNÉTIQUE À HAUTE RÉOLUTION SPATIALE ET HAUTE PRÉCISION DE POSITIONNEMENT

Figure 1.1 : (a) Orthophotographie du site néolithique du Pontet. (b) Carte des anomalies du gradient magnétique acquise en août 2014 et les différentes zones de prospection A, B, C, D et E délimitées lors de l'acquisition avec le protocole original de prospection magnétique. 95

- Figure 1.2 : (a) Schéma du déroulement de la phase de synchronisation. (b) Enregistrement de la position du réflecteur et du champ magnétique total par la station totale et le magnétomètre durant la phase de synchronisation. L'écart de temps entre les deux appareils est appelé φ 120
- Figure 1.3 : Cartes des densités de mesures (points/m²) des positions du réflecteur enregistrées par la station totale. Les densités ont été calculées pour chaque zone de prospection A, B, C, D et E selon une maille carrée de 1x1 m. Les rectangles pointillés rouges correspondent à des zones marquées par des arrêts de l'opérateur (points noirs) liés aux passages de voitures. 123
- Figure 1.4 : Relations graphiques pour chaque opérateur de la zone de prospection A des inter-distances entre deux positions successives enregistrées par la station totale avec la différence de temps entre ces deux positions. Histogramme des inter-distances entre deux positions successives utilisées pour l'interpolation des positions des mesures magnétiques pour les trois opérateurs. 124
- Figure 1.5 : Carte de la densité de mesure de la station totale lissée par une médiane glissante sur fond de la carte magnétique du Pontet réduite au pôle. 125
- Figure 1.6 : (a) Carte des anomalies magnétiques réduites au pôle du site néolithique du Pontet. (b) Carte magnétique annotée. 128
- Figure 1.7 : Agrandissement de la carte magnétique réduite au pôle sur l'entrée principale (I4) de l'enceinte externe (E1) du site du Pontet. 129
- Figure 1.8 : Traitements de l'image sur la carte magnétique réduite au pôle. (a) Dérivée directionnelle orientée 295N, les flèches bleues montrent des exemples de diaclases. (b) Écart-type local selon une fenêtre glissante de 1 m, les flèches rouges montrent des exemples de parcellaire. 129
- Figure 1.9 : Carte magnétique réduite au pôle avec la localisation des diaclases dans le substrat calcaire ... 131
- Figure 1.10 : Cartes magnétiques réduites au pôle superposées aux limites parcellaires (tracés verts) de différentes périodes historiques (sources : Archives départementales de la Charente-Maritime et Géoportail de l'IGN). Les anomalies rectilignes interprétées comme des parcellaires correspondent aux tracés rouges. 133
- Figure 1.11 : Carte magnétique réduite au pôle avec la localisation de différents bâtiments à diverses époques. Sources : Géoportail de l'IGN. 134
- Figure 1.12 : Carte magnétique réduite au pôle et son extension vers le nord de l'entrée principale (I4). 135
- Figure 1.13 : (a) Orthophotographie du site de la Garenne et localisation des prospections magnétiques. (b) Résultat de la prospection magnétique de janvier 2015 avec un protocole standard d'acquisition. 136
- Figure 1.14 : Comparaison entre le protocole d'acquisition standard (A) et le protocole couplant magnétomètre et station totale (B). La carte magnétique A possède une maille de 0,1x0,5 m. La carte magnétique B a une maille de 0,1x0,1 m. Les deux cartes ne sont pas réduites au pôle. Les flèches jaunes indiquent deux tranchées de palissade. 137
- Figure 1.15 : Carte de la densité de mesure de la station totale sur le site de la Garenne. La station totale est suffisamment éloignée pour que la zone critique n'affecte qu'une partie de la prospection. 138
- Figure 1.16 : Cartes des anomalies magnétiques réduites au pôle du site de la Garenne à Saint-Hippolyte. (a) Carte magnétique sans annotation. (b) Carte magnétique avec annotations. Les flèches vertes indiquent des parcellaires anciens. 140
- Figure 1.17 : Cartes de la conductivité électrique apparente. (a) Carte avec une profondeur d'investigation effective de 1,5 m (écartement inter-bobines de 1 m). (b) Carte avec une profondeur d'investigation effective de 0,75 m (écartement inter-bobines de 0,5 m). 142
- Figure 1.18 : Section de résistivité électrique réalisée avec un écartement inter-électrodes de 1 m et en double configuration Wenner-Schlumberger et dipôle-dipôle. Les profils de conductivité électrique apparente sont représentés en parallèle. 143

2 APPROCHES MULTI-MÉTHODES ET MULTI-ÉCHELLES DU SITE DU PONTET

- Figure 2.1 : (a) Carte synthétique des structures néolithiques identifiées du site du Pontet. (b) Carte annotée des anomalies magnétiques réduites au pôle. 145
- Figure 2.2 : Synthèse des emprises des prospections électriques et électromagnétiques réalisées en complément de la carte magnétique (réduite au pôle) du site néolithique du Pontet. 147
- Figure 2.3 : (a) Carte de conductivité électrique apparente à large maille (2x2 m) de la vallée bordant le site néolithique du Pontet pour une profondeur d'investigation de 1,5 à 5 m (EM31-MK2). (b) Carte de conductivité apparente à maille plus fine (1x1 m) pour une profondeur d'investigation de 1,5 m (EM38-MK2). 189
- Figure 2.4 : Photographies des affleurements géologiques près du site du Pontet (localisation sur la Figure 2.3b : affleurement 1 pour « a, b, c et e » et affleurement 2 pour « f »). (a) La falaise calcaire est composée à la base par des calcaire marneux grisâtres [1] riches en fossiles d'huîtres de type *Exogyra columba gigas*. La partie supérieure correspond à des calcaires blanc-grisâtre à miches carbonatées avec des fossiles d'huîtres [2]. (b) et (c) Fossiles d'*Exogyra columba gigas* présents sur la falaise. (d) *Exogyra columba gigas* ramassée en bas du versant. (e) Agrandissement sur les calcaires grisâtres à miches carbonatés [2] reposant sur les calcaires marneux [1]. (f) Calcaires blanchâtres à miches carbonatées [3], plus blancs que les calcaires [2]. 190
- Figure 2.5 : Transect électrique recoupant les enceintes externe (E1) et médiane (E2) composé des sections de résistivité électrique 1 et 2. Elles sont représentées en parallèle d'un profil magnétique extrait de la carte du site. 192
- Figure 2.6 : Sections de résistivité électrique 4, 5 et 6 représentées en parallèle de profils magnétiques. 197
- Figure 2.7 : Pénétrogrammes des fossés 1 à 3 de la section 4 (essais pénétrométriques effectués à 10 m plus au sud de la section) et des fossés 1 à 4 de la section 1. Qd : résistance de pointe. 198
- Figure 2.8 : Section de résistivité électrique 7 représentée en parallèle d'un profil magnétique extrait de la carte du site. 199
- Figure 2.9 : (a) Cartes de résistivité électrique apparente à 1 m d'écartement inter-électrodes (maille 1x1 m) superposées à la carte magnétique. (b) Cartes de résistivité apparente à 0,5 et 1 m d'écartement inter-électrodes superposées à la carte magnétique. 201
- Figure 2.10 : La structure G de l'enceinte externe. (a) Carte annotée des anomalies magnétiques. (b) Carte magnétique superposée aux isohypses d'altitude (0,1 m NGF). (c) Carte de la résistivité électrique apparente à 0,5 m superposée à la carte magnétique et aux isohypses. (d) Profils topographique, magnétique et électrique de la structure G correspondant aux lignes blanches sur les cartes. 202
- Figure 2.11 : (a) Carte de la topographie du toit du substrat calcaire avec ombrage (retrait de l'épaisseur de sol au MNS). (b) Modèle numérique de surface (MNS) avec ombrage. (c) Carte de l'épaisseur de sol estimée. (d) Carte des anomalies magnétiques réduites au pôle. 204
- Figure 2.12 : Profils 1, 2 et 3 localisés par des tracés rouges sur la Figure 2.11. Représentation en coupe de la variation de l'épaisseur de sol et de la topographie du toit du substrat calcaire au travers de l'enceinte externe et médiane. 205
- Figure 2.13 : Carte de la susceptibilité magnétique du site du Pontet. Échantillonnage des mesures selon une maille de 20x20 m. 207
- Figure 2.14 : Synthèse des emprises des prospections magnétiques réalisées en complément de la carte magnétique (réduite au pôle) du site néolithique du Pontet. 209
- Figure 2.15 : Extension de la carte magnétique du Pontet avec annotations superposée aux isohypses d'altitude à 1 m. Les diaclases (bleu) et les parcellaires (rouge) sont identifiés sur l'extension. 210
- Figure 2.16 : Extension de la carte magnétique du Pontet superposée au cadastre de 1824. 211

JE CHAPITRE V : PROSPECTIONS GÉOPHYSIQUES APPLIQUÉES À LA RECONSTITUTION PALÉOGÉOGRAPHIQUE - IMPLANTATION DE CAROTTAGES PALÉOENVIRONNEMENTAUX

1 APPROCHE PALÉOGÉOGRAPHIQUE DU SITE DU PONTET

- Figure 1.1 : La vallée du Grand Écours. (a) Modèle numérique de surface issu du produit Litto3D®. (b) Carte de la conductivité électrique apparente à large maille..... 218
- Figure 1.2 : Adaptation de l'échelle de couleur de la carte de conductivité électrique apparente avec la topographie. 219
- Figure 1.3 : Localisation des sections de résistivité électrique sur la carte de la conductivité électrique apparente. Les étiquettes numérotées des sections sont placées sur leurs positions zéro (sauf pour la section 5 où sa position zéro est proche de l'étiquette de la section 3). 221
- Figure 1.4 : Sections de résistivité électrique de la partie aval de la vallée. La position des carottages Soubise 1 et 2 est indiquée par deux traits rouges mis à l'échelle. 222
- Figure 1.5 : Sections de résistivité électrique de la partie aval de la vallée. 222
- Figure 1.6 : Sections de résistivité électrique de la partie aval. Les sections 6 et 7 sont couplées avec des profils de conductivité électrique apparente (CEa) extrait de la carte de CEa (Figure 1.3). Le profil de résistivité apparente (REa) de la section 6 résulte de la conversion du profil de CEa. Le carottage Soubise 1 est indiqué et mis à l'échelle sur la section 6, sa position est projetée orthogonalement (distance entre Soubise 1 et la section 6 :8 m)..... 223
- Figure 1.7 : Log stratigraphique synthétique des formations marno-calcaires du Cénomaniens moyen et supérieur et marneuses du Turonien inférieur. 225
- Figure 1.8 : Coupes selon l'axe Z à différentes altitudes du modèle 3D de résistivité généré à partir des sections électriques de la partie aval de la vallée. Les sections correspondent aux tracés noirs. 226
- Figure 1.9 : Sections électriques dans la partie centrale de la vallée..... 227
- Figure 1.10 : Sections électriques de la partie centrale de la vallée. La section 14a a été réalisée avec un écartement inter-électrodes de 2 m en double configuration Wenner-Schlumberger – dipôle-dipôle. La section 14b a été effectuée en parallèle de la section 14a mais avec écartement de 0,5 m, en configuration dipôle-dipôle. Les carottages Soubise 3 et 4 sont indiqués et mis à l'échelle sur les sections 14a-b. 228
- Figure 1.11 : Relation entre la conductivité électrique apparente mesurée par la méthode de la section électrique (ECa_{PS}) et la conductivité électrique apparente mesurée par la méthode électromagnétique (ECa_{EM31}). ECa_{PS} est mesurée en configuration Wenner-Schlumberger et ECa_{EM31} par le conductivimètre EM31. La pseudosection correspond à la section 14a. 230
- Figure 1.12 : (a) Localisation des sections électriques à 0,5 m, des essais pénétrométrique couplés à la diagraphie électrique et des carottages dans la partie aval de la vallée. (b) Localisation des essais pénétrométriques couplés à la diagraphie électrique et des carottages dans la partie centrale de la vallée..... 231
- Figure 1.13 : Sections électriques positionnées au niveau des carottages Soubise 1 et Soubise 2. 232
- Figure 1.14 : Log stratigraphique schématique de Soubise 2 (S2) associé au profil de résistivité électrique et au pénétrogramme issu du dispositif couplant diagraphie et pénétrométrie. Au centre, évolution de la granulométrie et de la teneur en eau en fonction de la profondeur. ANALYSES SÉDIMENTAIRE ET DESSIN DU LOG PAR CAROLE ROMÉY. DIAGRAMME GRANULOMÉTRIQUE PAR PIERRE STEPHAN. 233
- Figure 1.15 : Log stratigraphique schématique de l'enregistrement sédimentaire S2, illustrant les données sédimentologiques (teneurs en matière organique –MO-, carbonate de calcium -CaCO₃- et eau), granulométriques et magnétiques (ARI : aimantation rémanente isotherme, ARIs : aimantation rémanente isotherme à saturation (en anglais SiRM), K : susceptibilité magnétique, Bcr : champ coercitif rémanent, ARId : aimantation rémanente isotherme dure (en anglais HiRM)). ©C. Romey 235
- Figure 1.16 : Log stratigraphique schématique de l'enregistrement sédimentaire S1, illustrant les données granulométriques et magnétiques (ARA: aimantation rémanente anhystérétique, ARI : aimantation

rémanente isotherme, ARIs : aimantation rémanente isotherme à saturation (en anglais SiRM), K : susceptibilité magnétique, Bcr : champ coercitif rémanent, ARId : aimantation rémanente isotherme dure (en anglais HiRM). Se reporter à la Figure 1.15 pour les légendes du log stratigraphique. ©C. Romey. 236

- Figure 1.17 : Diagraphies 1 et 2 réalisées sur le long de la section électrique 14. Pénétrogrammes lissés sur une fenêtre de 11 valeurs (basse fréquence du signal)..... 238
- Figure 1.18 : Présentation des logs stratigraphiques schématisés des deux carottes jumelles Soubise 3 (S3) et Soubise 4 (S4) associés à la granulométrie et la teneur en eau de S3 (d'après C. Romey). Le profil électrique et le pénétrogramme de la diagraphie 2 est en parallèle de S3..... 240
- Figure 1.19 : Hypothèse de l'extension du dépôt d'abrasion de la falaise réalisée à partir de la synthèse de la carte de conductivité apparente, des sections électriques et des carottages de Soubise 1 et 2. 243
- Figure 1.20 : Profils de résistivité extraits des sections électriques 14a-b, 4 et 6. Ils sont associés aux profils électriques des diagraphies effectuées en parallèles de Soubise 2 et 3. Ces profils sont juxtaposés au log stratigraphique de Soubise 1, 2 et 3 (dessin : ©C. Romey). 245
- Figure 1.21 : Comparaison entre les sections électriques modélisées en double configuration avec les sections modélisées mono-quadripôle. Exemple des sections 4 et 6. 247

2 RECHERCHE DU PALÉO-COURS DE L'AUDE

- Figure 2.1 : Carte de la localisation des différentes zones de prospection pour la recherche du paléo-cours de l'Aude. 250
- Figure 2.2 : Le paléo-cours sud de l'Aude et les berges antiques. Carte des anomalies de conductivité apparente précisant le paléo-cours de l'Aude et les deux berges romaines. Localisation des sections électriques 1, 2, 3, 4, 5 et 6 de la zone du Castélou (C et D ; Mathé et al., 2016). 252
- Figure 2.3 : Sections électriques réalisées dans la zone du Castélou. 253
- Figure 2.4 : Confrontation entre la section 1 et les carottages Castel 8, 9 et 10 (Faisse et al., 2017). La section 1 bis correspond à la section 1 avec une inversion tenant compte des épaisseurs des alluvions argileuses et sableuses des carottes. 254
- Figure 2.5 : Résultats des prospections électromagnétiques et magnétiques réalisées entre 2009 et 2015 sur la zone de Mandirac. (a) Carte des anomalies de conductivité apparente et carte du gradient magnétique vertical, sans annotation. (b) Carte des anomalies de conductivité apparente et carte du gradient magnétique vertical avec annotations et localisation des sections de résistivité effectuées en 2015 (d'après Mathé et al., 2016). 256
- Figure 2.6 : Sections de résistivité réalisées dans la zone de Mandirac, près l'embouchure canalisée de l'ancien cours de l'Aude. La position du chenal le plus ancien correspond à C et le plus récent à F. 259
- Figure 2.7 : Sections de résistivité réalisées dans le méandre de la zone de Mandirac. Les courbes pointillées sur la section 4 indiquent la position probable de paléo-chenaux. La position du chenal le plus ancien correspond à C et le plus récente à F. 260
- Figure 2.8 : (a) Localisation des sections de résistivité sur le lieu-dit Fringuet. (b) Sections électriques réalisées au lieu-dit Fringuet. 262
- Figure 2.9 : Cartes de la conductivité apparente et localisation des sections électriques sur les zones de Craboulette et de Craboules, de l'Étang du Cercle, et de l'« autoroute ». 263
- Figure 2.10 : Transect de résistivité électrique 1, composé des sections 1 et 8 de la zone de l'Étang du Cercle. 265
- Figure 2.11 : Prospections électromagnétiques avec le conductivimètre EM31 dans la zone de Craboules et Craboulette. (a) Carte de la conductivité électrique apparente pour une profondeur d'investigation comprise entre 1,5 à 5 m. (b) Carte du signal en phase. 267
- Figure 2.12 : Sections de résistivité électrique 1 et 2 réalisées dans la zone de Craboules et Craboulette. 269
- Figure 2.13 : Sections de résistivité électrique 5 réalisées dans la zone de Craboules et Craboulette. 270

- Figure 2.14 : Carte de la conductivité électrique apparente mesurée à l'EM31 de la zone de Craboules et Craboulette. Agrandissement sur le transect de carottage et localisation des carottes et des diagraphies électriques couplées à la pénétrométrie. 274
- Figure 2.15 : Sections de résistivité électrique 1 et 5 réalisées dans la zone de Craboules et Craboulette. Elles sont superposées avec des courbes d'isovaleurs comprises entre 0 et 10 $\Omega.m$ avec un intervalle de 0,5 $\Omega.m$ 275
- Figure 2.16 : CRA-2. Colonne sédimentaire et analyses granulométriques de CRA-2 (d'après C. Flaux). Profil de résistivité électrique (courbe rouge) et pénétrogramme (courbe noire) réalisés en parallèle de CRA-2. Profil vertical des résistivités électriques (courbe verte) à la position de CRA-2 extrait de la section électrique 1. 279
- Figure 2.17 : CRA-1. (a) Colonne sédimentaire de CRA-1 (d'après C. Flaux). Profil de résistivité électrique (courbe rouge) et pénétrogramme (courbe noire) réalisés en parallèle de CRA-1. Profil vertical des résistivités électriques (courbe verte) à la position de CRA-1 extrait de la section électrique 5. (b) Colonne sédimentaire de CRA-10 (d'après C. Flaux) et profil vertical des résistivités électriques (courbe verte) à la position de CRA-10 extrait de la section électrique 5..... 280
- Figure 2.18 : CRA-4. Colonne sédimentaire de CRA-4 (d'après C. Flaux). Profil de la résistivité électrique (courbe rouge) et pénétrogramme (courbe noire) réalisés en parallèle de CRA-4. Profil vertical des résistivités électriques (courbe verte) à la position de CRA-4 extrait de la section électrique 1. 281

CHAPITRE I

-

Introduction

-

État de l'art de la prospection géophysique appliquée à l'archéologie et aux études paléoenvironnementales

L'Holocène est une période de réchauffement climatique associée à une déglaciation impliquant une remontée du niveau marin (Allen, 1995 ; Lambeck, 1997 ; Goslin et *al.*, 2013). Dans un premier temps, la phase transgressive est rapide jusqu'à environ 8000 ans BC. Ceci engendre une avancée du trait de côte dans les terres, inondant les vallées incisées durant le dernier maximum glaciaire. Après cette première phase, la remontée du niveau marin ralentit jusqu'à environ 3500 ans BC, où ce dernier atteint progressivement son niveau actuel (Lambeck, 1997). L'accrétion sédimentaire est importante et, par conséquent, induit un retrait progressif du trait de côte vers la mer. C'est durant cette phase que les marais et plaines maritimes de la côte atlantique, de la Manche et de la Mer du Nord se forment (Baeteman, 1991 ; Allen, 1995 ; Lambeck, 1997). La courbe de la remontée du niveau marin au cours des derniers millénaires est relative à la localité. Des processus tels que la compaction sédimentaire, l'érosion, les modifications des régimes tidaux et l'isostasie jouent un rôle sur la position relative du trait de côte et dans la qualité de l'enregistrement sédimentaire de cette transgression marine (Goslin et *al.*, 2013).

Depuis le début de l'Holocène, la remontée du niveau marin engendre une modification relativement rapide du littoral. L'occupation humaine dans ces espaces est dépendante de l'environnement côtier à la période chronologique considérée. De plus, les activités anthropiques associées à ces occupations dépendent aussi fortement de leur environnement immédiat. L'étude archéologique d'un site en zone littorale doit être accompagnée d'une approche paléogéographique et paléoenvironnementale, afin d'aboutir à une interprétation globale de l'occupation humaine et de ses activités en lien direct ou non avec son environnement.

L'étude archéologique d'un site est réalisée sur la base d'une fouille. Les résultats de celle-ci permettent d'acquérir des informations précises sur l'occupation humaine (type d'occupation, période chronologique, activité...) ainsi qu'une stratigraphie des différentes phases de cette occupation. La fouille est une étude précise du site sur une ouverture restreinte mais elle est destructrice et non-répétable. Dans une démarche complémentaire, la prospection géophysique permet des investigations non-destructrices et répétibles du site via différentes méthodes : magnétique, électrique, électromagnétique. La prospection géophysique est en capacité, entre autres, de réaliser une cartographie exhaustive de l'organisation générale du site en un temps relativement court. La géophysique apporte des informations complémentaires à la fouille en mettant en évidence les contrastes de propriétés physiques (anomalies) entre les structures archéologiques et leur encaissant. En amont d'une fouille, la prospection géophysique offre la possibilité de localiser une zone (ou des zones) intéressante et susceptible d'apporter des informations majeures pour la compréhension de l'occupation. Cette démarche permet de cibler l'implantation d'une fouille à partir de l'interprétation des données géophysiques (Becker et Faßbinder, 2001 ; Mathé et *al.*, 2012a ; Ard et *al.*, 2015a). Ainsi, l'intégration d'une approche géophysique participe à une répartition des ressources débloquées pour la fouille (durée de l'opération, nombre de fouilleurs, budget...) plus en adéquation avec la problématique archéologique

du site. Par conséquent, l'intégration de la géophysique au sein d'une étude archéologique est une démarche visant à accroître la « rentabilité » scientifique d'une fouille.

L'occupation humaine à une période chronologique donnée d'un site et ces activités qui lui sont associées dépendent du contexte environnemental. En milieu littoral, l'environnement évolue relativement rapidement et son lien avec le site en est important. La compréhension globale de l'occupation nécessite à la fois une approche archéologique et paléoenvironnementale (et paléogéographique). La prospection géophysique, réalisée à l'échelle du paysage environnant le site, fournit une approche paléogéographique (Saey et *al.*, 2012 ; Bates et Bates, 2016 ; Fischer et *al.*, 2016 ; Verhegge et *al.*, 2016 ; Faïsse et *al.*, 2017). L'utilisation de méthodes à la fois cartographiques et stratigraphiques apporte au géomorphologue une vision globale des contrastes sédimentaires de la subsurface. Ainsi, l'objectif de la prospection géophysique est semblable à celle énoncée pour la fouille : localiser une zone d'implantation des carottages. En effet, une étude paléoenvironnementale est basée sur l'analyse de carottes sédimentaires dont les coûts financiers et les durées d'expertise sont importants (Verhegge et *al.*, 2016). La reconnaissance par la géophysique des hétérogénéités du sous-sol en amont permet au géomorphologue de localiser les zones potentiellement intéressantes pour l'implantation de carottages, permettant ainsi d'accroître la « rentabilité » scientifique de l'étude.

1 PROSPECTION GÉOPHYSIQUE DU SITE ARCHÉOLOGIQUE

1.1 BREF HISTORIQUE

Même si des expériences géophysiques sur des sites archéologiques ont été menées entre les années 1930 et 1940, la prospection géophysique appliquée à l'archéologie s'est concrètement développée depuis la seconde moitié du XX^{ème} siècle (Hesse, 2005 ; Gaffney et Gater, 2010). L'histoire de la discipline est présentée et détaillée dans plusieurs ouvrages de référence comme Scollar et *al.* (1990), Clark (2000), Dabas et *al.* (2006) et Gaffney et Gater (2010). L'adaptation et le développement des méthodes géophysiques à l'archéologie ont été propulsés par la création des premiers laboratoires de recherche consacrés à ce domaine d'étude en Angleterre, en Allemagne, en France et en Italie (Scollar et *al.*, 1990 ; Dabas et *al.*, 2006). L'intérêt croissant des archéologues pour ces méthodes s'illustrent aussi par l'apparition des premières revues scientifiques d'archéométrie, éditant des articles sur la prospection géophysique appliquée sur des sites archéologiques comme *Prospezioni Archeologiche* (1966-1974), *Revue d'Archéométrie* (1974) et *Archaeological Prospection* (1994) et par des communications scientifiques dans divers colloques spécialisés ou généralistes (Dabas et *al.*, 2006). Ces productions scientifiques permettent la présentation d'études de cas et surtout la diffusion des savoir-faire et des nouvelles méthodologies. Le développement des méthodes géophysiques, comme l'utilisation de nouveaux appareils ou de nouvelles méthodes d'acquisition, est un aspect très important qui conditionne l'ancrage des investigations géophysiques en adéquation avec l'évolution des pratiques

archéologiques. En effet, ce développement est nécessaire pour répondre aux nouvelles problématiques de l'archéologie. L'évolution de ces problématiques oriente les méthodes géophysiques vers une instrumentation plus performante et vers un développement de protocoles avec une meilleure qualité de positionnement et de mesure.

1.2 ÉVOLUTION DE L'INSTRUMENTATION ET DES PRATIQUES

Les premières prospections géophysiques étaient réalisées avec des instruments sans mémoire informatique et l'enregistrement des mesures était manuscrite. Ceci rendait l'acquisition très longue et interdisait des cartographies sur plusieurs hectares (Scollar et *al.*, 1990 ; Hesse, 2005). L'enregistrement des mesures dans une mémoire interne de l'instrument (*datalogger*) fût un facteur important dans l'ancrage de la géophysique au sein de l'archéologie. Les progrès technologiques qui ont conduit à diminuer le temps d'intégration d'une mesure, à accroître la cadence des instruments et à augmenter la sensibilité des capteurs sont des améliorations instrumentales qui furent décisives. Les méthodes magnétiques et électriques furent les premières à profiter de ces avancées, offrant plus de facilité pour une cartographie exhaustive de sites (Scollar et *al.*, 1990 ; Dabas et *al.*, 2006). En effet, la durée d'intégration d'une mesure par les premiers magnétomètres était de plusieurs secondes et d'une dizaine pour les premiers résistivimètres. De nos jours, les magnétomètres ont une cadence standard de 10 à 20 mesures par seconde et les résistivimètres actuels réalisent une mesure en moins d'une seconde. La possibilité de prospecter un site relativement rapidement a ainsi permis d'inscrire la géophysique dans une démarche de conservation du patrimoine (Becker et Fassbinder, 2001 ; Křivánek, 2006 ; Mathé et *al.*, 2011 ; Gaffney et *al.*, 2012).

Globalement et selon les problématiques, l'intervention de la prospection géophysique au sein d'une étude archéologique peut être synthétisée selon trois scénarios. Le premier est la cartographie exhaustive du site (ou d'une partie) pour acquérir une vision globale de son organisation. La carte permet d'évaluer la nécessité de réaliser une fouille, ou de sonder une petite zone difficilement interprétable sur la seule base de la géophysique (Martinaud et *al.*, 1999 ; Mathé et *al.*, 2011 ; Nowaczinski et *al.*, 2015 ; Ard et *al.*, 2015a ; Gibson, 2017). Le second est une extension indirecte de la fouille par la cartographie des parties non-ouvertes afin d'obtenir la continuité des structures (Burnez et Hesse, 1967 ; Laporte, 2009 ; Ghesquière et *al.*, 2011 ; Hamon et Hulin, 2011 ; Louboutin, 2014). Le troisième est la prospection sur surface décapée pour acquérir un signal non perturbé par l'horizon supérieur du sol et le labour. L'objectif est de détecter d'éventuelles structures fantômes (Linford, 2004), d'apporter des informations complémentaires à l'archéologue (Hulin et *al.*, 2012), de comprendre le signal géophysique et de rechercher des structures archéologiques de petites dimensions (Ard et *al.*, 2015a), voire d'étudier un objet particulier (Lévêque et Mathé, 2015). Dans ces deux dernières interventions, la fouille a été réalisée dans le but de comprendre les structures à l'origine des anomalies repérées.

1.3 INTERACTION DISCIPLINAIRE ET TRAVAUX COMMUNS

L'interaction disciplinaire entre l'archéologie et la géophysique est un aspect important. Elle permet de faire progresser la recherche dans les deux disciplines, indépendamment l'une de l'autre en termes de production scientifique, mais surtout de faire évoluer cette discipline hybride qu'est l'archéométrie (au sens large du terme). Les apports des deux disciplines à la recherche archéologique et à l'évolution des pratiques (méthodologie) sont illustrés par des publications mettant en avant l'intérêt de la réflexion commune.

L'un des atouts principaux de la prospection géophysique est le changement d'échelle d'observation. En effet, l'interprétation d'un site est effectuée par la fouille. Cette dernière est une vision directe et précise des structures mais sur une surface réduite (plusieurs centaines à milliers de mètres carrés). La cartographie exhaustive d'un site, ou d'une partie, par des méthodes géophysiques offre une vision plus étendue mais indirecte (anomalie) des structures archéologiques. La précision et la résolution spatiale des investigations dépendent de la méthode utilisée et des structures recherchées. Plusieurs études interdisciplinaires sur des sites archéologiques illustrent l'intérêt du changement d'échelle apporté par la géophysique (Hasek et Kovarnik, 1999 ; Becker et Fassbinder, 2001 ; Ghesquière et *al.*, 2011 ; Louboutin, 2014 ; Mathé et *al.*, 2016 ; Gibson, 2017). Comme exemples pouvant être cités, les prospections géophysiques de l'agglomération antique de Brion (Gironde) fournissent une cartographie permettant à l'archéologue de se concentrer sur les zones d'intérêt tout en ayant une vision globale du site (Mathé et *al.*, 2011, 2012a). Un autre exemple serait les prospections magnétiques réalisés autour du site de Stonehenge. Elles dévoilent la présence de nombreuses traces de structures mégalithiques du même type offrant de nouvelles interprétations de ce monument (Gaffney et *al.*, 2012).

La prospection géophysique en contexte archéologique nécessite une adaptation des instruments et des protocoles d'acquisition pour détecter au mieux les anomalies associées à des structures. En effet, la prospection géophysique n'est pas qu'une simple application des méthodes ou, selon l'expression anglaise, un « plug and play » (Bates et Bates, 2016). De ce fait, l'application des méthodes géophysiques à l'archéologie a nécessité une réflexion du géophysicien pour adapter ces protocoles aux contraintes et aux problématiques archéologiques. Pour la prospection magnétique, la plupart des géophysiciens collaborant avec des archéologues développent leurs propres supports de capteurs pour limiter au maximum les diverses perturbations. L'objectif de ces développements est de pouvoir détecter les plus petites anomalies magnétiques possibles (Eder-Hinterleitner et *al.*, 1996 ; Becker et Fassbinder, 2001 ; Mathé et *al.*, 2006 ; Linford et *al.*, 2007 ; Ard et *al.*, 2015a ; Lévêque et Mathé, 2015). Pour la prospection électrique, des études ont été réalisées sur le type de quadripôle à employer en fonction du protocole utilisé : carte électrique (Martinaud, 1990, 1997) ou section de résistivité électrique (Berge et Drahor, 2011). Le développement méthodologique ne se traduit pas nécessairement par une déstructuration de l'instrument de base mais aussi par la manière d'utiliser l'instrument. Comme, par exemple, pour la prospection en 3D de tumuli par des sections de résistivité où la démarche d'installation

des sections et des limites rencontrées sont discutées par Tsourlos et *al.* (2014) ou l'adaptation des protocoles conventionnels de prospection électromagnétique et électrique pour la détection de structures portuaires dans des environnements hyper-salins (Delefortrie et *al.*, 2014 ; Mathé et *al.*, 2016).

La confrontation entre les résultats de la fouille et les données issues de la prospection géophysique est un autre point clé de l'amélioration des méthodes et des protocoles. En effet, cette confrontation permet de comprendre l'origine du signal et d'évaluer l'efficacité et les faiblesses du protocole. Par exemple, l'étude sur le site néolithique de Chenommet montre l'intérêt de cette démarche car elle a permis de comprendre l'origine du contraste d'aimantation entre les différents fossés de l'enceinte (Ard et *al.*, 2015a). La confrontation entre la fouille et la géophysique offre aussi la possibilité de critiquer les méthodes et les protocoles employés et de discuter des améliorations à apporter pour augmenter leur pouvoir de détection des structures.

1.4 PROBLÉMATIQUE ET TRAVAUX DE THÈSE

L'une des problématiques abordées dans ces travaux est le développement d'un protocole de prospection magnétique pour détecter des petites structures inférieures à une quarantaine de centimètres à l'intérieur d'enceintes fossoyées du Néolithique. La prospection magnétique est l'une des méthodes les plus efficaces car les fossés présentent un fort contraste d'aimantation entre le comblement et l'encaissant. Plusieurs études montrent l'efficacité de cette méthode sur ces enceintes en Europe (Eder-Hinterleitner et *al.*, 1996 ; Hasek et Kovarnik, 1999 ; Lück et Eisenreich, 1999 ; Doneus et *al.*, 2001 ; Křivánek, 2006 ; Ard et *al.*, 2015a). Cependant, les fouilles récentes mettent en évidence des petites structures (trous de poteau, palissade) et des habitats à l'intérieur de ces enceintes (Ard et *al.*, 2009 ; Ghesquière et *al.*, 2011 ; Ard, 2012). Leurs détections par des protocoles standards de prospection magnétique (comme le gradiomètre FEREX de type *fluxgate*) sont difficiles en raison d'une résolution spatiale, d'une précision du positionnement ou d'une sensibilité des capteurs insuffisante. En effet, une étude récente a montré l'intérêt d'exploiter conjointement un magnétomètre sensible et une station totale pour développer un protocole plus performant en terme de précision de mesure et de positionnement (Ard et *al.*, 2015a). L'intérêt de ce protocole original est la détection des structures pluri-décimétriques (trous de poteau, palissade) et pluri-métriques (fossés, fosses) en amont d'une opération archéologique. D'ailleurs, l'utilisation conjointe d'un magnétomètre très sensible et d'une station totale est aussi exploitée par un protocole de cartographie 3D du champ magnétique total développé pour la détection de foyers en grotte où la précision infra-décimétrique du positionnement est nécessaire (Burens et *al.*, 2014 ; Grussenmeyer et *al.*, 2014 ; Lévêque et Mathé, 2015 ; Jaubert et *al.*, 2016).

Ce protocole de prospection magnétique couplant un magnétomètre très sensible avec une station totale et sa chaîne de traitement des données est développé dans la première partie du chapitre IV de la thèse. La méthodologie de ce protocole original est détaillée dans un article accepté par la revue

interdisciplinaire *Archaeological Prospection*. Le site néolithique à enceinte fossoyée du Pontet situé à Saint-Nazaire-sur-Charente (Charente-Maritime, France) a été utilisé comme zone d'étude pour tester et mettre en place ce protocole. Trois sous-parties viennent compléter l'article :

- Un complément sur les informations non présentées ou simplement énoncées dans l'article ;
- Une interprétation détaillée de la carte magnétique du Pontet et une extension de cette carte réalisée avec le même protocole ;
- L'application du protocole sur un autre site néolithique, la Garenne à Saint-Hippolyte (Charente-Maritime), afin de l'évaluer dans un contexte proche mais différent.

La seconde partie du chapitre IV se focalise sur un développement méthodologique dont l'objectif est d'obtenir une estimation du potentiel de conservation d'un niveau d'occupation. Ce développement est basé sur une étude interdisciplinaire alliant des prospections géophysiques, une fouille archéologique, des prises de vues aériennes et des compléments issus d'un outil géotechnique. La synthèse de cette étude est développée sous la forme d'un article soumis à la revue interdisciplinaire *ArchéoSciences*. Deux sous-parties découlent de cet article :

- Les hypothèses énoncées dans l'article seront vérifiées par des études complémentaires ainsi que l'exploitation de prospections géophysiques supplémentaires réalisées pour mieux comprendre le site néolithique. L'objectif est de préciser les zones avec un « fort » potentiel de conservation du niveau d'occupation ;
- Une extension de la carte magnétique du site a été effectuée, avec des protocoles standards de prospection géophysique, pour la recherche de structures à l'extérieur de l'enceinte fossoyée.

2 APPROCHE GÉOPHYSIQUE DE LA PALÉOGÉOGRAPHIE DU SITE

L'étude archéologique d'un site nécessite aussi une approche paléogéographique afin de replacer l'occupation humaine dans son contexte environnemental. Cette approche est nécessaire pour comprendre le lien entre les activités liées à l'occupation et son implantation. Dans les contextes littoraux, l'évolution relativement rapide des environnements au cours de l'Holocène (remontée du niveau marin) ont des conséquences sur les choix d'implantation des occupations et de leurs activités au cours des derniers millénaires. Il est donc nécessaire de connaître l'environnement ancien pour comprendre l'occupation dans sa globalité et les interactions avec ce dernier.

2.1 GÉOPHYSIQUE ET APPROCHE PALÉOGÉOGRAPHIE : ÉTAT DE L'ART

Les méthodes géophysiques en cartographie (2D horizontale) et en stratigraphie (2D verticale) sont exploitées pour caractériser les interfaces lithologiques et sédimentaires. Dans le cadre des environnements côtiers, les méthodes électromagnétiques (type *Slingram*) et électriques sont particulièrement efficaces pour la localisation d'anciens traits de côte (Mathé, 2010), de paléo-chenaux (Camus et *al.*, 2011 ; Saey et *al.*, 2012 ; Bates et Bates, 2016 ; Mathé et *al.*, 2016 ; Fäisse et *al.*, 2017) et la représentation cartographique et stratigraphique des contrastes sédimentaires (Mathé, 2010 ; Delefortrie et *al.*, 2014 ; Bates et Bates, 2016 ; Fäisse et *al.*, 2017 ; Fischer et *al.*, 2016 ; Mathé et *al.*, 2016 ; Verhegge et *al.*, 2016). Ces méthodes s'appliquent dans différents types d'environnements côtiers comme d'anciens marais littoraux (Mathé, 2010 ; Camus et *al.*, 2011), d'anciennes lagunes (Fäisse et *al.*, 2017), des polders (Saey et *al.*, 2012 ; Verhegge et *al.*, 2016), voire sur les estrans (Delefortrie et *al.*, 2014 ; Bates et Bates, 2016).

Plusieurs études montrent l'intérêt de l'utilisation en zone littorale de la prospection géophysique comme outil d'approche paléogéographique de l'environnement (Saey et *al.*, 2012 ; Bates et Bates, 2016 ; Verhegge et *al.*, 2016 ; Fäisse et *al.*, 2017). Néanmoins, les études paléoenvironnementales sont basées sur l'analyse des sédiments et des proxys paléoenvironnementaux prélevés à la suite d'une campagne de carottage. Ces analyses sont effectuées et interprétées par un géomorphologue. Dans la majorité des cas, les carottages sont implantés avant les prospections géophysiques. Ces dernières sont réalisées pour acquérir une géométrie continue des corps sédimentaires identifiés par l'analyse des carottes (Slater et Reeve, 2002 ; Gourry et *al.*, 2003 ; Hirschberger et *al.*, 2006 ; Apostolopoulos et *al.*, 2014 ; Fischer et *al.*, 2016).

Cependant, les études paléoenvironnementales sont coûteuses en durée d'analyse et représentent une part importante dans les crédits alloués à un programme de recherche s'intéressant à la relation entre une occupation et son environnement. Il est donc nécessaire d'acquérir un maximum d'informations sur le comblement sédimentaire de la zone d'étude en amont d'une campagne de carottages. Dans cette optique, les prospections électromagnétiques (type *Slingram*) et électriques sont utilisées pour fournir

une première approche de la paléogéographie de l'environnement. Ainsi, les carottages sont positionnés sur la base de cette étude préliminaire. D'ailleurs, une étude récente porte comme perspective d'effectuer des prospections géophysiques en amont d'une campagne de carottages paléoenvironnementaux comme étant une bonne stratégie d'investigation pour localiser la zone d'implantation des carottes et limiter les coûts financiers liés à l'opération (Verhegge et *al.*, 2016).

Que la prospection géophysique ait été réalisée en amont ou après la campagne de carottage, les données géophysiques nécessitent une confrontation avec des données externes. En effet, en zone littorale sous influence marine, la conductivité/résistivité électrique (propriété mesurée en prospection électromagnétique et électrique) est sensible principalement à la lithologie et aux variations de salinité. Ces environnements sont sujets à des mélanges d'eaux souterraines de salinité différente (biseau salée) dont les études hydrogéologiques montrent l'intérêt de ces méthodes (électromagnétiques et électriques) pour identifier les interfaces entre eau douce et eau salée (Salama et *al.*, 1994). Sans une confrontation des mesures géophysiques à des données issues de carottages (vision directe et ponctuelle du sédiment), il est difficile de distinguer si la répartition spatiale des conductivités/résistivités traduit des variations sédimentaires (informations recherchées) ou des contrastes de salinité (Brus et *al.*, 1992 ; Bates et Bates, 2016).

2.2 PROBLÉMATIQUE ET TRAVAUX DE THÈSE

Le chapitre V de la thèse s'intéresse à une démarche pour positionner des carottages paléoenvironnementaux. Elle est basée sur une approche paléogéographique de l'environnement (associé à un site), élaborée à partir de prospections géophysiques multi-méthodes et multi-échelles. Cette démarche consiste à employer un protocole de prospection électromagnétique pour cartographier les contrastes de conductivité électrique apparente sur l'ensemble de la zone d'étude (plusieurs dizaines hectares) avec une résolution pluri-métriques. Sur cette base, des sections de résistivité électrique sont positionnées et elles correspondent à une représentation stratigraphique des contrastes de résistivité de la subsurface. Les cartes de conductivité apparente et les sections électriques apportent une vision dans l'espace des hétérogénéités du sous-sol à partir d'un ensemble de plans en deux dimensions, horizontaux et verticaux, se recoupant (ces représentations sont dites en pseudo-3D ou en 2,5D). Cette démarche méthodologique permet déjà au géomorphologue d'identifier une zone d'intérêt pour implanter des carottages.

Dans un second temps, l'étude des carottes sédimentaires fournit une information paléoenvironnementale non-portée par les prospections géophysiques (proxies environnementaux : pollens, ostracodes, foraminifères, *etc.*). L'interprétation des carottes croisée avec les données géophysiques, à la fois 2D cartographique et stratigraphique, offre une vision continue des formations sédimentaires et une représentation plus étendue de ces dernières.

Afin de tester et de valider cette démarche méthodologique, deux zones d'étude ont été sélectionnées. La première zone est le site néolithique du Pontet situé à Saint-Nazaire-sur-Charente (Charente-Maritime), à proximité immédiate du marais maritime de Rochefort et de l'estuaire de La Charente. Les sédiments correspondent à des alluvions fines fluvio-marines déposés principalement durant l'Holocène (Bourgueil, 2005 ; Laporte et *al.*, 2009b). La seconde zone d'étude correspond aux ports antiques de Narbonne (Aude) sur la côte méditerranéenne. Les formations sédimentaires correspondent aux alluvions vaseuses et sableuses des lagunes narbonnaises et au delta de l'ancien cours de l'Aude (Falguéra et *al.*, 2000 ; Sanchez et *al.*, 2011a ; Mathé et *al.*, 2016 ; Faïsse et *al.*, 2017).

Ces deux zones d'études sont situées dans des contextes géographiques, géomorphologiques et archéologiques différents. Le choix de deux environnements est guidé par la volonté de discuter de cette démarche basée sur une approche paléogéographique par des méthodes géophysiques pour implanter des carottages. Les résultats obtenus entre les deux sites seront comparés pour identifier les avantages et les limites de chaque méthode géophysique utilisée en fonction du contexte environnemental.

CHAPITRE II

-

Présentation des zones d'étude

-

Le site néolithique du Pontet (Charente-Maritime)

Les ports antiques de Narbonne (Aude)

-

Contextes géographiques, géologiques et archéologiques

1 LE SITE NÉOLITHIQUE DU PONTET : MARAIS DE ROCHEFORT

Le Pontet est un lieu-dit situé sur la commune de Saint-Nazaire-sur-Charente, en bordure du marais de Rochefort et à proximité de la ville éponyme, dans le département de la Charente-Maritime, sur la façade atlantique de la France (Figure 1.1 et 1.2). Sur ce lieu-dit, une enceinte néolithique a été découverte par Éric Bouchet en 2009 sur la base de photographies aériennes, visible sur la BDORTHO® 2006 de l'IGN® (Figure 1.3). Cette synthèse sur le contexte géographique, géomorphologique, géologique et archéologique du marais de Rochefort n'est pas exhaustive. Seules les informations nécessaires pour la suite sont présentées.

1.1 CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE ET GÉOLOGIQUE

La première étude exhaustive de géographie physique des marais charentais a été réalisée lors des travaux de thèse de Regrain (1980). Le marais de Rochefort est une zone humide littorale caractérisée par un relief relativement plat et de basse altitude. Seules des buttes témoins calcaires, correspondant à d'anciens îlots, viennent perturber cette platitude (Figure 1.3). Cette zone humide est bordée par deux reliefs au nord et au sud correspondant à des plateaux calcaires. Au nord, le plateau jurassique composé par des calcaires argileux séparant le marais de Rochefort du marais Poitevin. Au sud, le plateau calcaire du Crétacé supérieur (Figure 1.4). Ce dernier sépare le marais de Rochefort de celui de Brouage. Le fleuve de la Charente et son estuaire s'écoulent au sud du marais de Rochefort. Le lit de la Charente est logé dans le creux du *synclinal de Saintes* dont la partie visible correspond au plateau du Crétacé supérieur.

Le site néolithique du Pontet est localisé sur le *synclinal de Saintes*, à environ 5 km de l'embouchure de la Charente. Il est implanté sur le plateau calcaire bordant la vallée du Grand Écours, perpendiculaire au cours de ce fleuve (Figure 1.2). Le substrat correspond aux *Marnes à Exogyra columba gigas* et aux *Calcaires à Rudistes* du Turonien inférieur et supérieur (Bourgueil et al., 1972). Les versants de ce vallon correspondent à des falaises mortes et des paléo-falaises formant des reliefs abrupts qui contrastent avec la platitude de la zone humide, caractérisant le fond de vallée.

1.1.1 Formations sédimentaires ante-holocènes et tectonique régionale

Les formations sédimentaires du Jurassique correspondent aux marnes et aux calcaires argileux du Kimméridgien et du Portlandien (Figure 1.4). Les premiers dépôts sédimentaires du Crétacé supérieur sont de l'Albien et du Cénomaniens inférieur. Ils sont discordants sur la série jurassique. Ils correspondent à des argiles noires riches en bois fossile et en ambre et sont alternés avec des formations sableuses et gréseuses. La sédimentation est carbonatée du Cénomaniens moyen jusqu'au Sénonien et elle est caractérisée par des séquences marno-calcaires riches en fossiles marins tels des ammonites, des

oursins, des huîtres, des rudistes et des gryphées (Bourgueil *et al.*, 1972 ; Moreau et Platel, 1982 ; Platel, 1996 ; Perrichot, 2003).



Figure 1.1 : Localisation des sites du Pontet et de La Garenne. a) À l'échelle départementale. (b) À l'échelle de l'estuaire de la Charente.

Les déformations et plissements des formations mésozoïques du marais de Rochefort résultent de la compression de la plateforme nord-aquitaine au cours de la collision continentale entre les plaques européenne et africaine (formation des Pyrénées) durant le Paléogène. Cette épisode tectonique forme

les grands structures anticlinales et synclinales orientés NW-SE (Platel, 1996), comme celle du *synclinal de Saintes*.

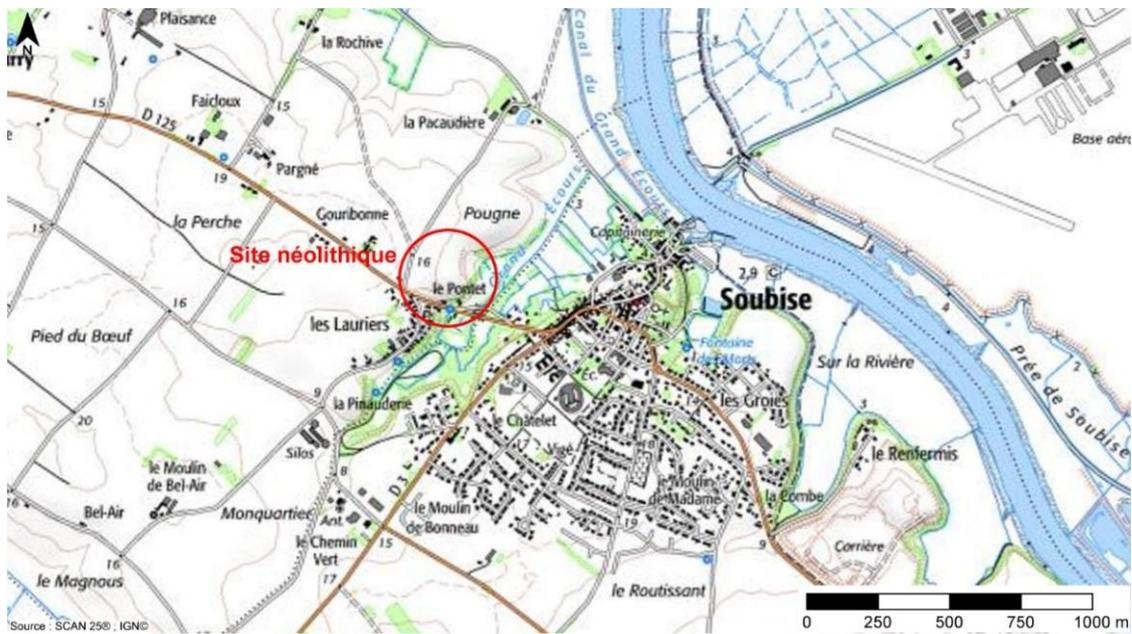
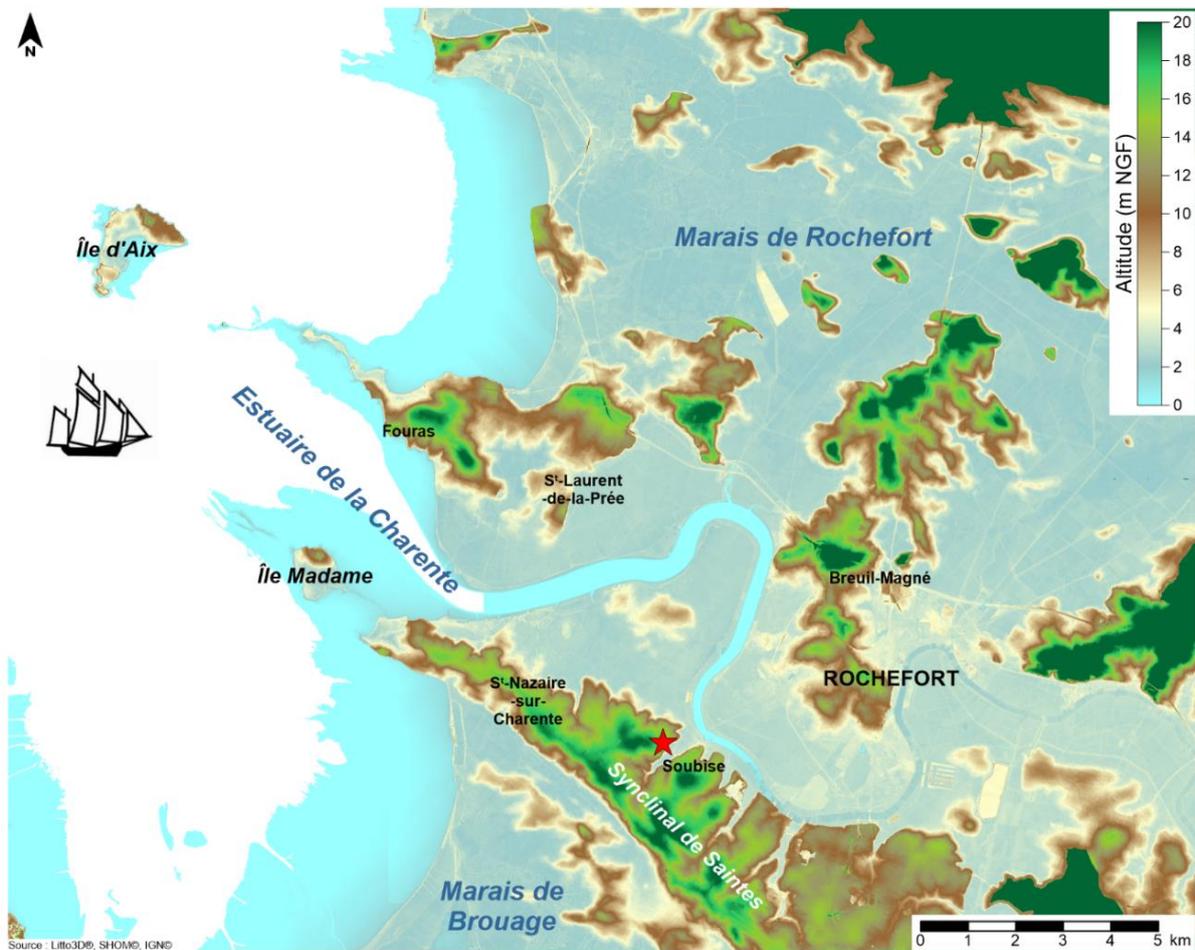
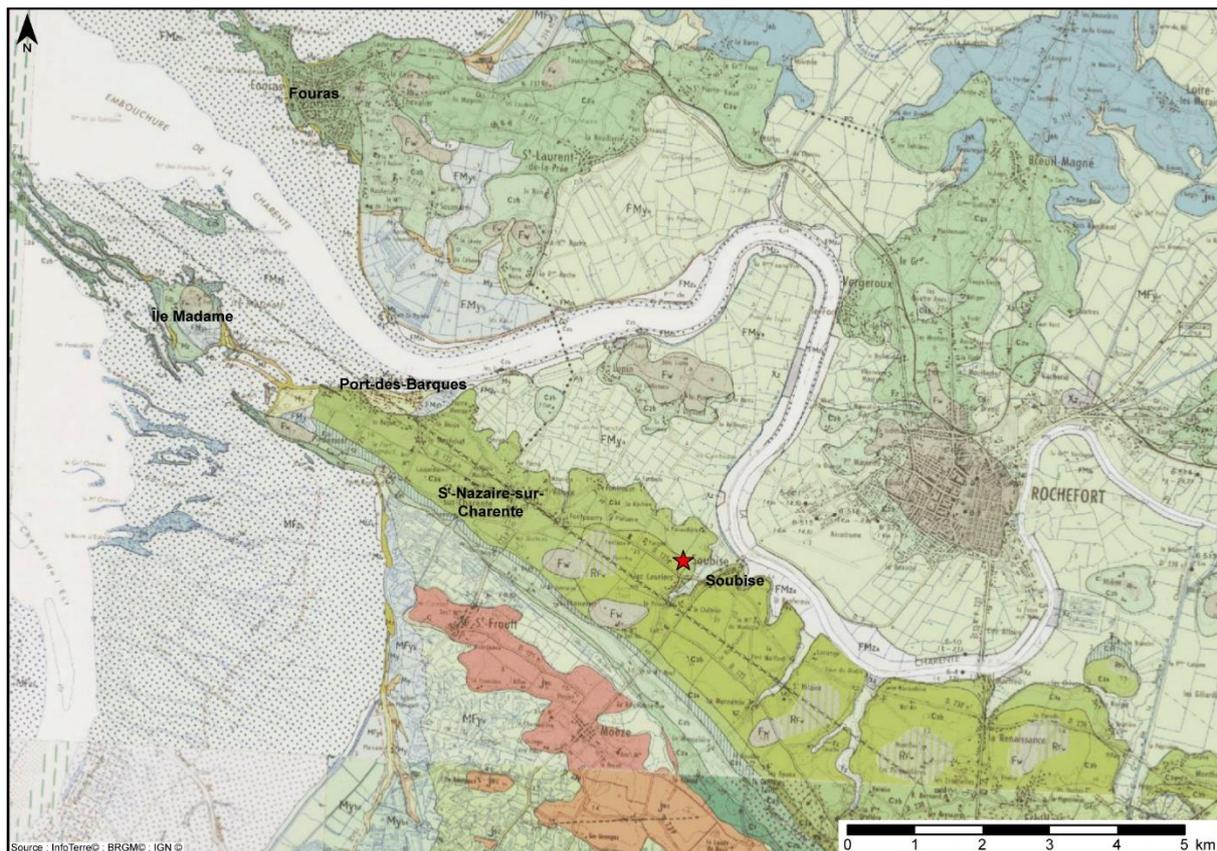


Figure 1.2 : Localisation du site du Pontet et de la vallée du Grand Écours sur la carte topographique au 1/25000 (IGN)



★ Site néolithique du Pontet (Saint-Nazaire-sur-Charente)

Figure 1.3 : Carte du relief du marais de Rochefort et de l'estuaire de la Charente.



★ Site néolithique du Pontet (Saint-Nazaire-sur-Charente)

QUATERNAIRE

- FMzb Vase, Alluvions à apport fluvial dominant
- FMza Vase sableuse brune, vase silteuse brune d'estuaire (shorre)
- Cordons littoraux actuels et anciens
- FMyb Vases silteuses brunes (mattes et prises récentes) d'origine fluvio-marine
- FMya Vases silteuses brunes (mattes et prises récentes) d'origine lagunoo-marine
- FMya Alluvions flamandaises «Bri bleu» d'origine fluvio-marine
- FMya Alluvions flamandaises «Bri bleu» d'origine laguno-marine
- Fw Alluvions fluviales anciennes siliceuses
- C Colluvions : argiles, débris calcaires, limons

MÉSOZOÏQUE

Crétacé

- C3b Calcaire à rudistes (Turonien supérieur)
- C3a Calcaires tendres, Calcaires argileux à *Exogyra columba*, Calcaire à Huitres, détritiques et glauconieux (Turonien inférieur)
- C2c Calcaires à Ichthyosarcolites (niveau supérieur), sables et grès à huitres, calcaire argileux (Cénomaniens supérieur)
- C2b Calcaires à Rudistes et à Alvéolines (Cénomaniens moyen)
- C2a Sables, grès et argiles (Cénomaniens inférieur)

Jurassique

- J9c Calcaire argileux et Marnes (Portlandien supérieur, faciès purbeckien)
- J9b Calcaires argileux (Portlandien supérieur)
- J8b Calcaires argileux et marnes à *Exogyra virgula* (Kimméridgien)

Figure 1.4 : Extrait de la carte géologique de Rochefort au 1/50000 (Bourgeuil et al., 1972). N.B. : les notations des étages des cartes géologiques de la France au 1/50000 ont été modifiées en 1997 (Callec et al., 2006) ; celles employées sont obsolètes et se réfèrent à la notation de 1972.

L'érosion des terrains mésozoïques et cénozoïques favorise l'apparition de grandes dépressions ouvertes dans les roches sédimentaires tendres des marnes et des calcaires argileux du Jurassique (Bourgeuil, 2005). L'incision du substrat par le fleuve de la Charente forme progressivement une vallée incisée durant les cycles glaciaires et interglaciaires du Pléistocène (Figure 1.5, A). Il en va de même pour les petites vallées incisées sur les bordures du marais de Rochefort, comme pour celle du Pontet.

1.1.2 Formations sédimentaires holocènes

À la fin du dernier maximum glaciaire (Würm : 21000 ans BP), le niveau marin remonte très rapidement et envahit les grandes dépressions issues de l'érosion des marnes et calcaires argileux du Jurassique (Figure 1.5, B). Le marais de Rochefort correspond à un golfe avec des îlots dispersés (buttes témoins). La sédimentation est importante et composée par des alluvions fines fluvio-marines (terme régional : Bri) et des niveaux tourbeux dans les zones abritées. Le colmatage sédimentaire du golfe est progressif. En effet, de 8500 à 2100 ans BP, la vitesse de remontée du niveau marin est supérieure au taux de sédimentation, et le golfe de Rochefort est en eau (Bourgueil, 2005 ; Figure 1.5, C). Vers 2100 ans BP, le taux d'accrétion sédimentaire est supérieur à la vitesse de remontée du niveau marin. Dans ces conditions, un colmatage par des alluvions fines du golfe s'opère globalement de l'est vers l'ouest. Ceci entraîne la fermeture du golfe et forme progressivement le marais de Rochefort (Carbonel *et al.*, 1998 ; Bourgueil, 2005 ; Laporte *et al.*, 2009 ; Figure 1.5, D).

Dans le marais de Rochefort, l'épaisseur du Bri est très variable allant de 0,5 m sur les bordures du marais à plus de 35 m au niveau de l'estuaire de la Charente. Dans les petites vallées incisées, ces épaisseurs peuvent être supérieures à 10 m. Le Bri est un sédiment relativement homogène composé majoritairement d'argile (plus de 50 %). Des niveaux tourbeux sont présents dans des environnements abrités permettant la stagnation d'eau et l'accumulation de débris de végétaux (Bourgueil *et al.*, 1972). Le Bri possède une salinité de l'eau interstitielle élevée (concentration en chlore : 15,5 g/l). Cette salinité est héritée de son origine marine et la faible perméabilité du sédiment fin limite fortement l'infiltration d'eau douce (précipitations). De ce fait, la conductivité électrique du Bri (mesurée sur des échantillons d'eau) est très élevée et varie entre 17 et 35,2 mS/cm (Ladouche et Weng, 2005). Le drainage par de nombreux canaux artificiels (eau douce) dans le marais de Rochefort diminue à leurs abords la salinité du Bri.

1.2 CONTEXTE ARCHÉOLOGIQUE : EXPLOITATION DU SEL

L'occupation anthropique du marais de Rochefort est ancienne et remonte au moins jusqu'au Néolithique, en témoigne la présence de nombreux dolmens dans la région. Du fait de l'évolution relativement rapide des environnements littoraux dans cette zone au cours de l'Holocène, les différentes populations humaines se sont adaptées à ces changements. Les occupations se sont déplacées en fonction de l'évolution du trait de côte et beaucoup de sites archéologiques anciens et de dolmens sont actuellement sous le Bri. Ainsi, la majorité des sites encore accessibles sont principalement localisés sur les plateaux, en bas de versant et sur les anciens îlots.

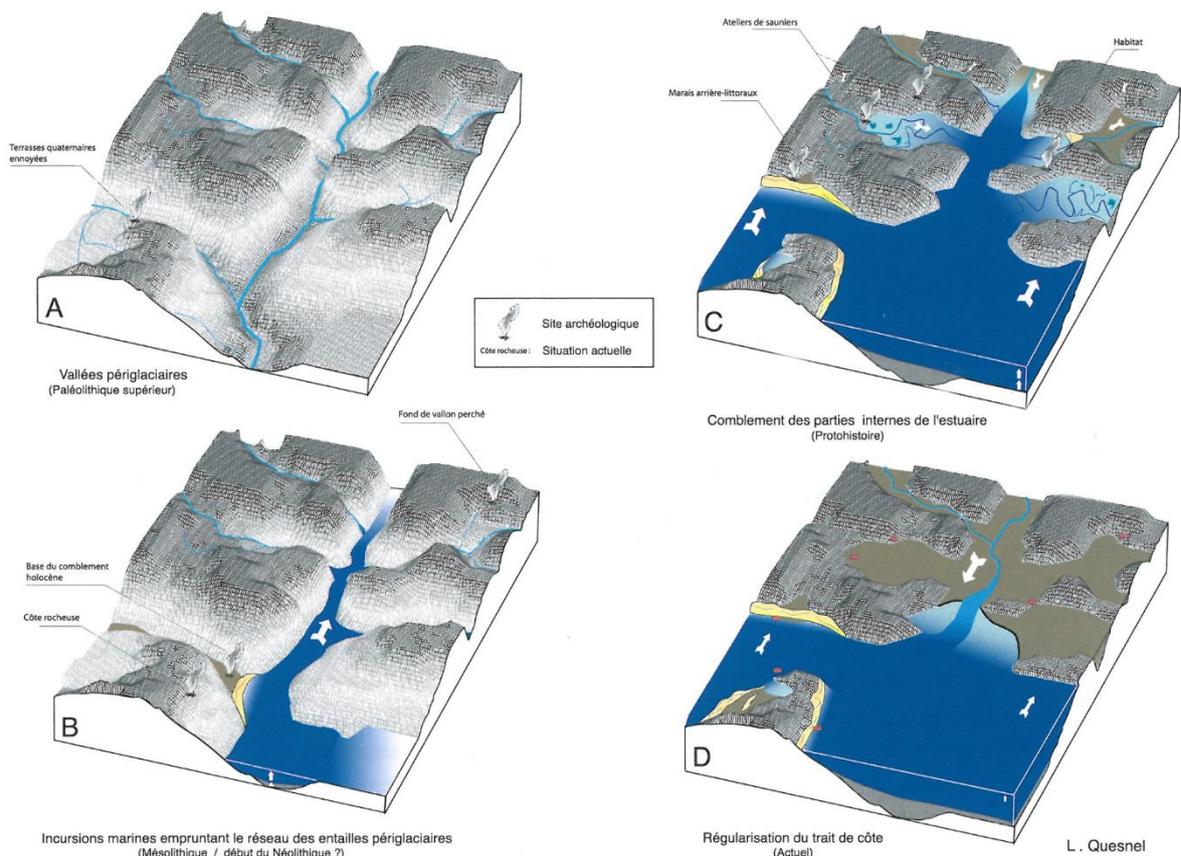


Figure 1.5 : Évolution schématique de la Charente au cours de l'Holocène (DAO : Quesnel L. ; Laporte et al., 2009).

Le marais de Rochefort et aussi les autres marais charentais sont associés à l'exploitation du sel qui est attestée depuis la période du Néolithique (Ard et Weller, 2014). La majorité des ateliers de saunier reconnus sont de la période de La Tène (V^{ème} au I^{er} siècle av. J.-C. ; Age du Fer). Ces sites se caractérisent par de grandes concentrations de fragments d'auget, c'est-à-dire de moules en céramique qui servaient à la production de pains de sel (Daire, 2003). L'implantation des sites de sauniers dans le marais de Rochefort est dépendante des matières premières à disposition. Les sites à sel reconnus sont localisés en bordure du marais et sur les anciens îlots. Une étude sur l'implantation des sites de sauniers dans les marais de Rochefort et de Brouage est actuellement portée par le programme collectif de recherche (PCR) sur la « Dynamique d'occupation et d'exploitation du sel dans les golfes charentais, du Néolithique à l'Age du Fer » (Mathé et Ard, 2015 ; 2016). L'étude du site du Pontet est intégrée à ce PCR.

1.3 LE SITE NÉOLITHIQUE DE LA GARENNE (SAINT-HIPPOLYTE)

Le site néolithique de la Garenne à Saint-Hippolyte (Figure 1.1) est une zone d'étude secondaire dans le marais de Rochefort. Il est localisé à 15 km de l'estuaire de la Charente, à 10 km du site du Pontet et à 7 km de la ville de Rochefort. Il est positionné à proximité du cœur du *synclinal de Saintes*, dans la même séquence géologique du Crétacé supérieur que le site du Pontet, et en bordure du marais de Rochefort. Au Néolithique, le site de la Garenne était dans un environnement côtier plus marqué qu'il

ne l'est actuellement, impliquant des activités en lien avec la proximité de la mer. Ce site est implanté sur le versant sud de la Charente dont le substrat est caractérisé par les *Calcaires à Rudistes et à Alvéolines* du Cénomaniens moyen (Figure 1.6). Il est localisé près d'une petite vallée perpendiculaire au cours actuel de la Charente, creusée dans le substrat calcaire. Les versants de cette vallée correspondent à des paléo-falaises. Le fond de vallée est comblé par les alluvions fluvio-marines : Bri (Bourgueil et al., 1972).

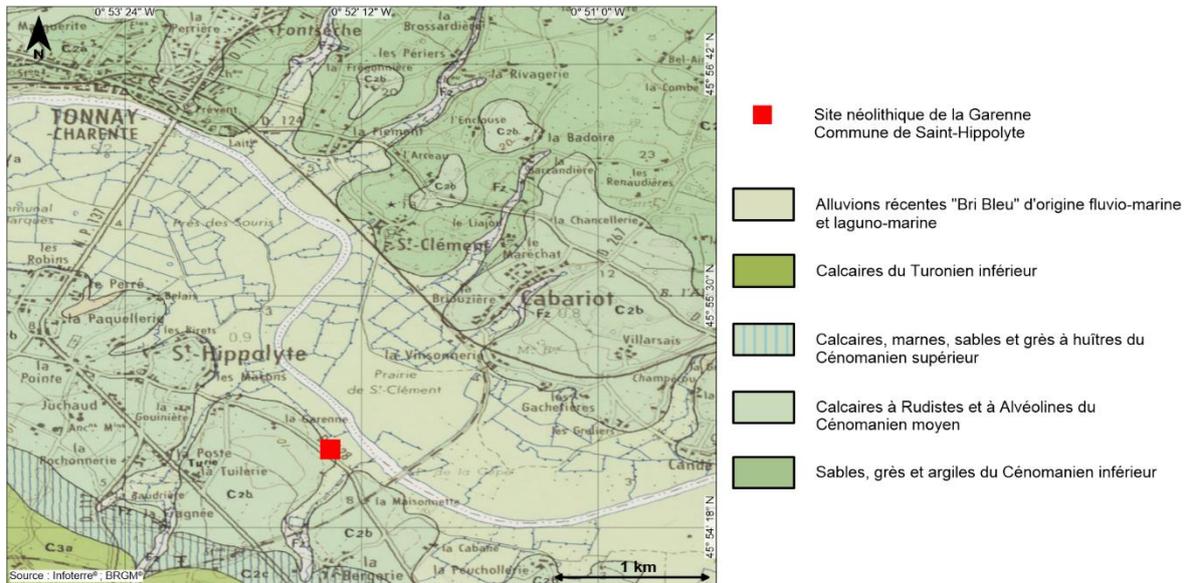


Figure 1.6 : Extrait de la carte géologique de Rochefort au 1/50000 (Bourgueil et al., 1972).

2 LES PORTS ANTIQUES DE NARBONNE

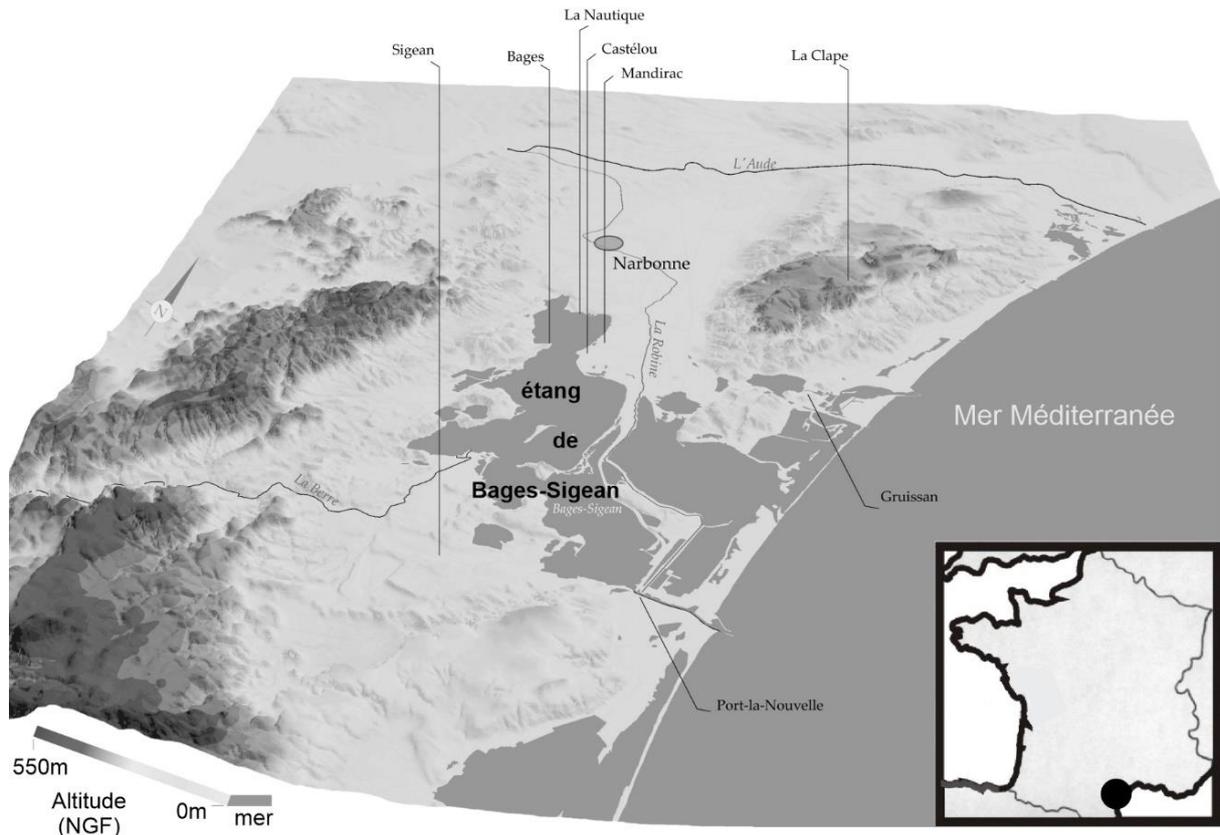


Figure 2.1 : Cadre géographique de Narbonne (d'après Mathé et al., 2016, DAO : J. Cavero).

2.1 CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE

La ville de Narbonne est localisée en bordure du golfe du Lion sur la côte méditerranéenne de la France (Figure 2.1). Narbonne est implantée sur une terrasse fluviale de l'Aude : terrasse de Lunes. Sa plaine alluviale s'est formée dans un rift cénozoïque (grande dépression) façonné durant l'épisode tectonique de l'ouverture de la Méditerranée. Cette dépression est bordée par les massifs calcaires mésozoïques des Corbières, à l'ouest, et de La Clape, à l'est (Figure 2.1 et 2.2).

Narbonne est traversée par le canal de la Robine qui se jette dans l'étang de Bages-Sigean. Il correspond au bras sud de l'Aude. Actuellement, le fleuve Aude s'écoule au nord du massif de La Clape (Figure 2.1). Au dernier maximum glaciaire, l'Aude s'écoulait plus à l'ouest de ce massif et avait un cours que l'on suppose proche de celui de la Robine. Les anciennes terrasses fluviales témoignent de cet ancien cours (Figure 2.2). L'étang de Bages-Sigean correspond à une lagune qui est partiellement coupée de la mer par les barrières sableuses (Cavero, 2011).

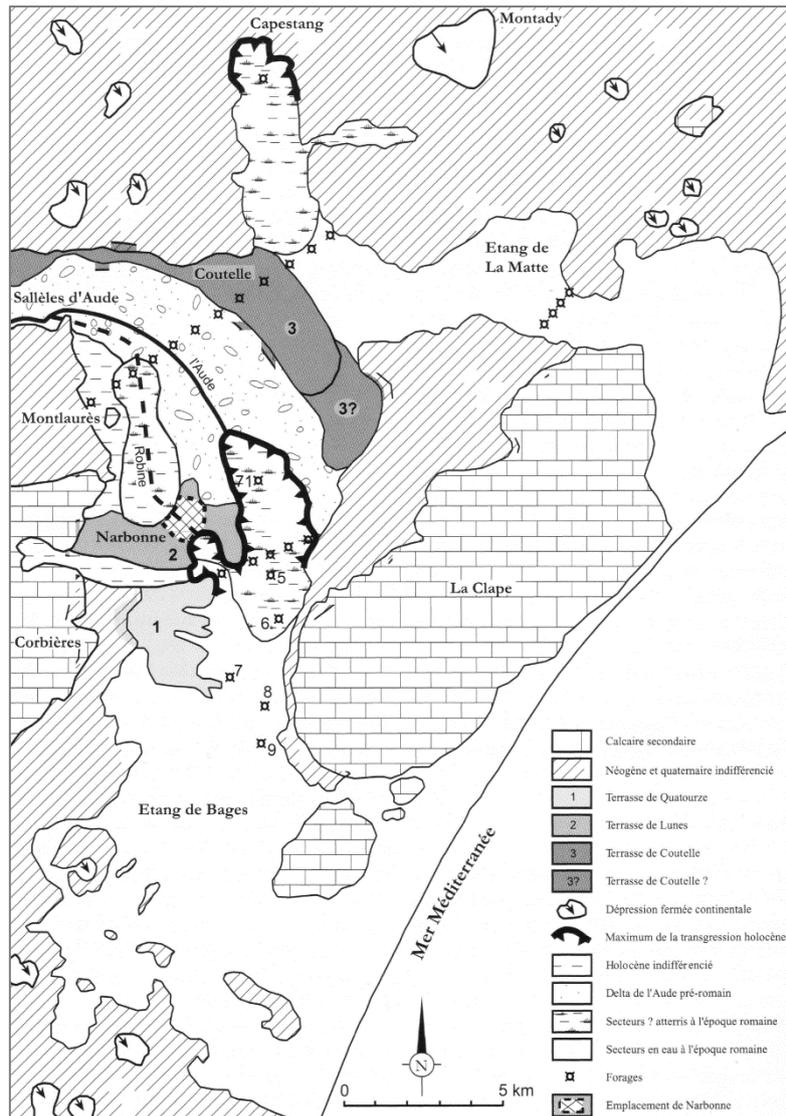


Figure 2.2 : Cadre géologique général de la région de Narbonne et de l'étang de Bages-Sigean (©Requirand C., (Cavero, 2011).

Le paysage des lagunes narbonnaises s'acquiert progressivement avec la remontée du niveau marin de l'Holocène. Schématiquement, l'étang de Bages-Sigean était une baie marine et le delta de l'Aude était situé plus nord, entre les massifs des Corbières et La Clape (Figure 2.3). L'environnement autour de Narbonne était alors une lagune partiellement fermée par des barrières sableuses. Vers 2500 BP, la remontée marine se ralentit et le trait de côte recule vers la mer. Le front deltaïque progresse jusqu'aux lieux-dits de Mandirac et du Castélou. La baie marine de Bages-Sigean devient peu à peu une lagune ouverte sur la mer. La sédimentation holocène autour de Narbonne est ainsi principalement composée par des alluvions fluviatiles deltaïques et lagunaires (Cavero, 2011 ; Faisse et *al.*, 2017).

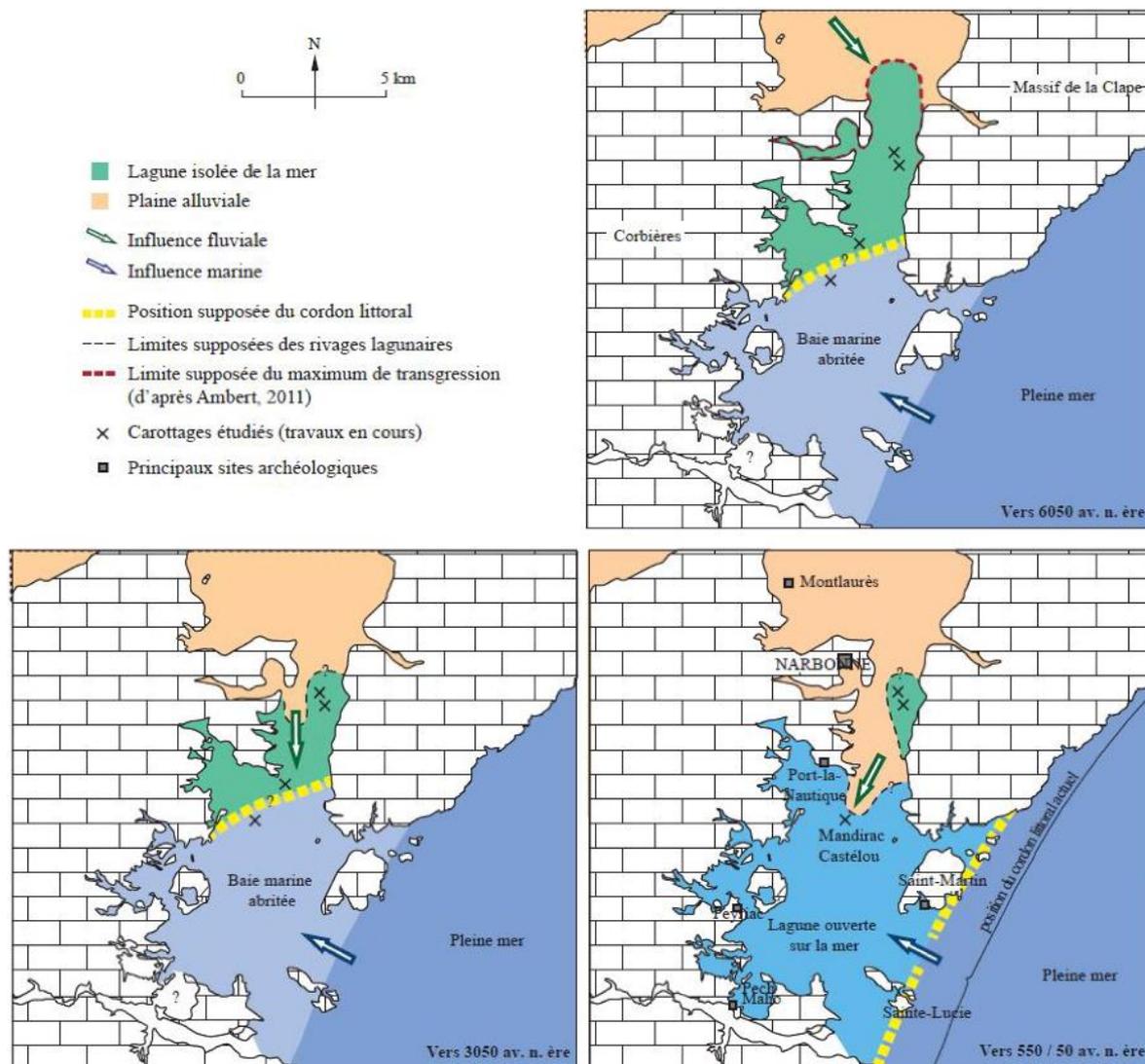


Figure 2.3 : Hypothèses de reconstitution paléogéographique du bassin de l'Aude au cours des derniers millénaires (©Sael T., Sanchez, 2013).

2.2 CONTEXTE ARCHÉOLOGIQUE

Durant l'Antiquité romaine, Narbonne fût la capitale de la province de *Gallia Narbonensis* et elle fût l'un des ports les plus importants du Monde romain d'Occident. En effet, le fleuve Aude était une voie commerciale majeure pour remonter les marchandises vers l'intérieur des terres, notamment sur la route commerciale reliant la Méditerranée à l'Angleterre (*Britania*). L'importance de la ville et de ses activités commerciales et économiques sont attestées par différents auteurs antiques. Cependant, peu de documentation existe sur l'organisation du port antique de Narbonne (Sanchez et Jézégou, 2011). Depuis la seconde moitié du XX^{ème} siècle, plusieurs études se sont intéressées à comprendre l'organisation du port et à l'évolution environnementale de la plaine alluviale (Verdeil, 1970 ; Ambert, 1993 ; 2000). Depuis 2005, des recherches interdisciplinaires sont entreprises et coordonnées par Corinne Sanchez pour comprendre l'organisation du port antique. Les travaux ont commencé par une synthèse de la littérature disponible suivis par des investigations sur des sites sur les pourtours de l'étang

de Bages-Sigean (Sanchez et Jézégou, 2011). Cette synthèse montre que le port de la ville de Narbonne était probablement associé à des avant-ports. Les premières structures portuaires confirmées ont été découvertes à Port-la-Nautique, située en bordure de l'étang de Bages-Sigean. Ce port a fonctionné du I^{er} siècle av. J.-C. au I^{er} siècle ap. J.-C (Falguéra et *al.*, 2000). Néanmoins les dimensions de ces infrastructures portuaires ne sont pas suffisantes pour correspondre à l'important complexe recherché.

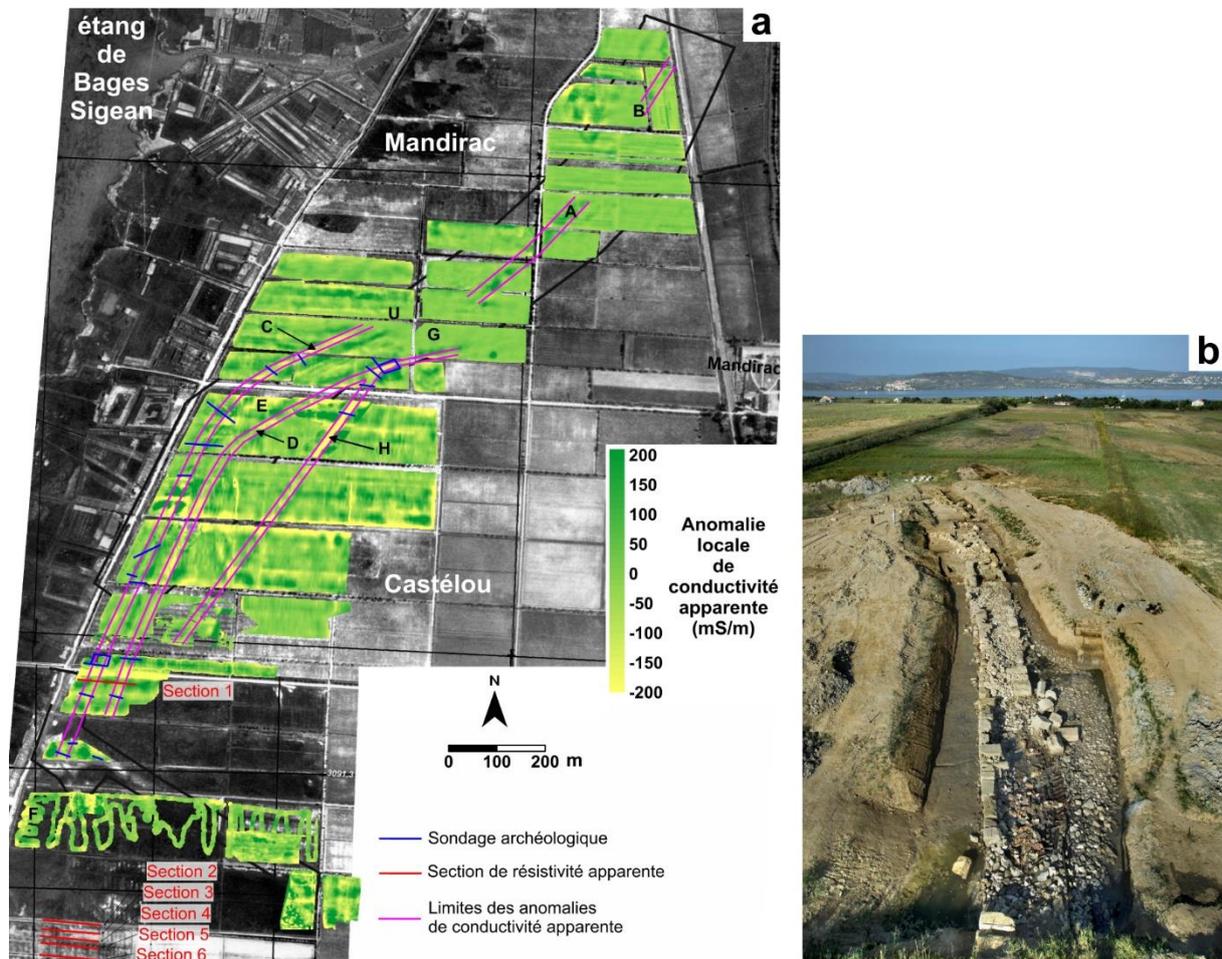


Figure 2.4 : Le paléo-cours sud de l'Aude et les digues romaines. (a) Carte des anomalies de conductivité apparente précisant le paléo-cours de l'Aude (A, B et E) et les deux berges romaines (C et D ; Mathé et al., 2016). (b) photographie de la digue gauche (Sanchez et Jézégou, 2014).

Les recherches récentes ont mis en évidence la présence de structures portuaires repérées sur la base de photographies aériennes au niveau des lieux-dits de Mandirac et du Castélou. Ces structures sont en lien avec le bras sud de l'Aude partiellement repris par l'actuel canal de la Robine (Falguéra et *al.*, 2000). Des prospections électromagnétiques et magnétiques, dirigées par Vivien Mathé, ont débuté en 2007 pour préciser le tracé de ces structures et du paléo-chenal. Sur cette base, des sondages archéologiques, dirigés par Corinne Sanchez, ont été positionnés. Ils ont mis en évidence la présence de deux berges parallèles composées de blocs de pierre, associées à des aménagements portuaires correspondant à des quais. Ces berges ont une largeur d'environ 15 à 25 m et elles sont espacées de 50 m l'une de l'autre, dans leur partie terminale. Des carottages paléoenvironnementaux ont aussi été

effectués pour reconstruire l'évolution du chenal durant l'Antiquité (Fäisse et *al.*, 2017 ; Mathé et *al.*, 2016 ; Sanchez et *al.*, 2011b).

L'embouchure canalisée de l'Aude est située aux lieux-dits Mandirac et Le Castérou, à une distance d'environ 6 km de la ville de Narbonne. L'objectif des prospections géophysiques réalisées dans ces travaux de thèse est de faire le lien entre l'embouche et la ville. Ceci est effectué par la recherche des paléo-chenaux et des possibles structures portuaires associées.

CHAPITRE III

-

Matériels, méthodes et protocoles utilisés

-

Principe et état de l'art

Cette partie présente les différentes méthodes d'investigations qui ont été utilisées dans ces travaux. Les principes généraux des méthodes géophysiques et géotechniques sont présentés sous la forme d'une synthèse bibliographique générale et non-exhaustive. Les prospections géophysiques réalisées dans ces travaux ont utilisés des méthodes électriques, électromagnétiques et magnétiques. Pour la géotechnique, c'est la pénétrométrie. La dernière méthode d'investigation présentée est l'imagerie aérienne par drone et l'acquisition d'orthophotographie.

1 LA PROSPECTION ÉLECTRIQUE

Cette synthèse bibliographique sur la méthode électrique par courant continu en prospection géophysique de surface est basée sur les ouvrages de référence de Reynolds (1997) et Telford et *al.* (2004) et les cours de géophysique appliquée de Chapellier (2000) et Dubois et *al.* (2011). Pour le détail du formalisme mathématique de la méthode électrique, l'ouvrage de Telford et *al.* (2004) le décrit de manière précise et complète.

1.1 DÉFINITION DE LA RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

La prospection électrique, telle qu'utilisée dans ces travaux, regroupe l'ensemble des méthodes basées sur la mesure de la résistivité électrique de la subsurface par l'injection artificielle d'un courant électrique continu ou alternatif à basse fréquence (par exemple : 137 Hz). Les méthodes électriques utilisant la polarisation spontanée et la polarisation induite ne seront pas abordées ici. La résistivité électrique (notée ρ) quantifie la difficulté d'un courant électrique à circuler dans un volume donné et s'exprime en ohm-mètre ($\Omega.m$). Son inverse est la conductivité électrique (notée σ) qui s'exprime en géophysique de surface en millisiemens par mètre (mS/m). A partir de la loi d'Ohm, il est possible de définir la résistivité électrique comme la résistance électrique (notée R) d'un cylindre de section A et de longueur L :

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad \text{avec la loi d'Ohm } U = RI$$

Eq. 1.1

U : différence de potentiel électrique (en volt) ;

I : intensité du courant électrique (en ampère).

1.2 LES PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES DU SOL

Dans les sols, la propagation d'un courant électrique est principalement fonction de la conduction électrolytique. Ce type de conduction se fait par le déplacement des ions présents dans la solution du sol et par les cations dans la double couche électronique à la surface des argiles (conduction surfacique). Les propriétés électriques du sol dépendent de nombreux paramètres :

- La porosité : la résistivité électrique dépend du type de porosité et de son taux de saturation en eau. Une porosité ouverte et saturée permet une bonne circulation d'un courant électrique ;
- La teneur en eau ou taux de saturation du sol ;
- La texture : la fraction argileuse du sol offre une bonne propagation du courant électrique, notamment liée à la présence de cations sur la surface des argiles (double couche électronique). En revanche, les sables et graviers sont de très mauvais conducteurs quand ils sont en état insaturé en eau et en l'absence de fraction fine ;
- La nature des argiles : les argiles n'ont, en effet, pas toute la même capacité d'échange cationique (CEC). Par exemple la kaolinite possède une CEC plus faible que l'illite ;
- La concentration ionique dans la solution du sol (salinité) ;
- La proportion et la dimension des blocs résistants (calcaire, granite...) dans le milieu ;
- La nature et la profondeur d'apparition du substrat sur lequel le sol s'est développé.

La résistivité électrique du sol dépend donc de la quantité totale d'ions mobilisables, résultant de la concentration ionique dans la solution du sol et de la capacité d'échange cationique (CEC). Ces deux paramètres sont en partie fonction du type de porosité, de l'état de saturation des pores, du type d'argile et de la fraction argileuse.

1.2.1 La Loi d'Archie : relation entre résistivité, porosité et teneur en eau

La relation entre la résistivité électrique de la fraction solide d'une roche, la porosité et la résistivité du fluide interstitiel est définie par la loi d'Archie (1942). Cette formule empirique relie la résistivité d'une roche ou d'un sol sans fraction argileuse (ρ_r) avec la résistivité de l'eau interstitielle (ρ_w) contenue dans les pores (Φ). Elle fût discutée par plusieurs auteurs, notamment pour quantifier l'influence du taux de saturation (S) des pores sur la résistivité de la roche (Keller, 1968 ; Friedman, 2005) :

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

Eq. 1.2

Les paramètres a , m et n sont des constantes intrinsèques au milieu. La non-linéarité de la résistivité électrique avec la porosité et le taux de saturation en eau sont fonction de m et n (Friedman, 2005). La résistivité d'un sol saturé ($S = 1$) dépend de sa porosité et de la résistivité électrique de l'eau interstitielle. Ainsi, quand la concentration ionique (salinité) dans la solution augmente, la résistivité de l'eau interstitielle diminue ainsi que celle du sol. Inversement, la résistivité du sol augmente quand la

porosité diminue ou quand le sol est insaturé en eau. Les facteurs environnementaux tels que le taux de précipitation et la remontée de la nappe alluviale (comme les biseaux salés près des milieux côtiers) sont des paramètres influençant la résistivité du sol de manière périodique et/ou épisodique.

Dans sa forme actuelle (Eq. 1.2), la loi d'Archie ne fonctionne pas sur les sols avec une fraction argileuse importante. En effet, cette formule empirique ne tient pas compte de la conduction surfacique liée aux argiles et à la CEC. Cependant, dans un milieu où la salinité est élevée, la contribution de la conduction surfacique des argiles est négligeable par rapport à la contribution de la conduction électrolytique de l'eau interstitielle sur la résistivité mesurée (Choo et Burns, 2014). Dans le cas des sols argileux en milieu salé, la loi d'Archie peut être applicable si ses constantes sont expérimentalement étalonnées. L'étalonnage n'est valable que pour la zone étudiée, comme pour les sols argileux du marais de Rochefort où la Loi d'Archie a été adaptée à cet environnement (Bernard-Ubertosi et *al.*, 2009) :

$$\rho_s = 1,01\Phi^{-2,73}S^{-2}\rho_w$$

Eq. 1.3

ρ_s : résistivité électrique du sol avec une fraction argileuse

1.2.2 La température

La température est un facteur extrinsèque au sol qui influence sa résistivité électrique. Dans un fluide, tel que l'eau interstitielle du sol ou de la roche, l'augmentation de la température se traduit par une diminution de sa viscosité entraînant une meilleure mobilité des ions. Globalement, la résistivité du sol décroît avec l'augmentation de la température. Cependant, la variation de la résistivité avec cette dernière n'est pas constante avec la profondeur, surtout dans les deux premiers mètres (Hayley et *al.*, 2007). Ceci est notamment lié à la variation de température du sol qui présente un contraste entre la surface et ses parties inférieures. Ces contrastes dépendent principalement de la texture et de la teneur en eau du sol (Gobat et *al.*, 2003).

Plusieurs formules empiriques décrivent la variation thermique de la résistivité électrique. Cependant, elles sont dépendantes du type de sol (notamment liées à la fraction argileuse) avec lesquelles elles ont été étalonnées. Elles permettent de corriger les résistivités à une température donnée vers une résistivité de référence à 25 °C (Hayley et *al.*, 2007 ; Besson et *al.*, 2008). Ces lois empiriques sont souvent employées en agriculture de précision, en suivi de pollution des sols ou en géotechnique (Chapellier, 2000 ; Sudduth et *al.*, 2001 ; Corwin et Lesch, 2005 ; Bernard-Ubertosi et *al.*, 2009).

La correction de la variation thermique de la résistivité n'est pas effectuée dans ces travaux car elle est supposée négligeable. En effet, les prospections électriques ont été réalisées dans des conditions climatiques très peu variables durant des saisons estivales sans précipitation.

1.3 PRINCIPE DE LA MESURE DE LA RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

Après avoir énuméré la notion de résistivité électrique et les paramètres du sol l'influençant, cette partie est consacrée à sa mesure. Les principes de base et les hypothèses conditionnant la mesure de la résistivité électrique du sol seront abordés.

1.3.1 Circulation du courant électrique dans un milieu homogène

Dans un milieu infini, homogène et isotrope, l'injection d'un courant électrique continu d'intensité I (ampère) par une électrode enterrée se fait par une propagation radiale de lignes de courant (champ électrique) dans toutes les directions. Il existe un potentiel électrique V (volt) qui décroît selon un gradient négatif liée à la résistance électrique du milieu. Les lignes de même potentiel, appelées équipotentielles, sont orthogonales aux lignes de courant. Le gradient du potentiel électrique dépend de la densité de courant et de la résistivité du milieu selon l'équation de Laplace. Après résolution de cette équation et intégration, la résistivité électrique du milieu est exprimée en fonction du potentiel électrique (V_r) mesuré à une distance r de l'électrode et de l'intensité I :

$$\rho = \frac{4\pi V_r}{I}$$

Eq. 1.4

Cette expression de la résistivité électrique n'est valable que pour une électrode enfouie dans un milieu infini, homogène et isotrope.

1.3.2 Circulation du courant électrique par une boucle de courant dans un demi-espace : le quadripôle

Si les électrodes sont implantées à la surface du sol, le milieu correspond alors à un demi-espace considérée homogène et isotrope et de résistivité donnée. La partie supérieure du demi-espace est associée à de l'air possédant une résistance infinie. L'injection d'un courant électrique par une électrode implantée à la surface se fait par la propagation de lignes de courant radiales selon une demi-sphère centrée sous l'électrode. La formulation de la résistivité de l'Eq. 1.4 devient :

$$\rho = \frac{2\pi r V_r}{I}$$

Eq. 1.5

En prospection électrique de surface, la mesure de la résistivité est réalisée par un jeu de quatre électrodes (quadripôle) composées de deux électrodes d'injection A et B et deux électrodes de mesure de potentiel M et N. L'injection du courant électrique est effectuée par le premier couple générant une boucle de courant. Les lignes de courant ne sont plus rayonnantes depuis l'électrode d'émission mais se propagent de A (+I) vers B (-I). Le potentiel électrique est mesuré par les deux autres électrodes M et

N, séparées respectivement d'une distance MA et MB et NA et NB, des électrodes A et B. Le potentiel électrique mesuré sur les deux électrodes M et N s'exprime par les relations :

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{MA} - \frac{1}{MB} \right)$$

Eq. 1.6

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{NA} - \frac{1}{NB} \right)$$

Eq. 1.7

Comme la propagation du courant électrique est régie par des expressions linéaires, les potentiels V_M et V_N peuvent se soustraire pour définir la différence de potentiel électrique entre M et N :

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{MA} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{NA} + \frac{1}{NB} \right] \Leftrightarrow \rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \left[\frac{1}{MA} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{NA} + \frac{1}{NB} \right]^{-1}$$

Eq. 1.8

Cette expression de la résistivité possède une partie associée à la résistance électrique ($\Delta V/I$) et une autre partie décrivant la géométrie de la configuration des électrodes. Cette dernière est définie comme le facteur géométrique (noté K ; en mètre). Celui-ci est une constante pour un écartement inter-électrodes fixé et il dépend de la configuration des électrodes utilisée. Ainsi, l'expression générale de la résistivité électrique d'un quadripôle s'écrit :

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K = RK \quad \text{avec} \quad K = 2\pi \left[\frac{1}{MA} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{NA} + \frac{1}{NB} \right]^{-1}$$

Eq. 1.9

La mesure de la résistivité électrique par un quadripôle présente plusieurs propriétés :

- La résistivité ne dépend pas de l'intensité de courant (I) injectée dans le milieu ;
- L'injection d'un courant électrique par les électrodes A et B ou par M et N n'a pas d'influence sur la mesure : c'est le principe de réciprocité ;
- La résistivité ne dépend pas de la configuration des électrodes utilisée.

1.3.3 Cas des milieux non-homogènes : la résistivité électrique apparente

Les différentes expressions mathématiques énoncées précédemment pour déterminer la résistivité électrique sont développées dans le cas d'un milieu homogène et isotrope. La propagation des lignes de courant et des équipotentiels ne présentent pas de perturbations. Dans la réalité, le substrat, le sol ou le sédiment ne peuvent pas être considérés comme un tel milieu idéal. En effet, ils sont stratifiés et présentent des variations latérales et verticales de résistivité : ce sont des milieux hétérogènes. De ce

fait, la propagation des lignes de courant et des équipotentiels n'ont pas la même répartition spatiale suivant le contraste de résistivité existant entre les milieux traversés.

La mesure de la différence de potentiel électrique sur un terrain quelconque (composé schématiquement d'un ensemble de couches unitaires de résistivité donnée) ne permet pas, en réalité, de déterminer la résistivité « vraie » du milieu. C'est la résistivité dite « apparente » qui est quantifiée. La résistivité électrique apparente (notée ρ_a) peut être considérée comme une « moyenne pondérée » des résistivités des différents couches traversés par le courant électrique. En utilisant l'Eq. 1.9, son expression est :

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K = RK$$

Eq. 1.10

Par conséquent, la résistivité apparente ne correspond pas à une propriété physique mais plutôt à un paramètre du terrain prospecté, contrairement à la résistivité « vraie ». Néanmoins, des méthodes mathématiques sont employées pour déterminer les résistivités « vraies » des milieux rencontrés à partir des résistivités apparentes : c'est l'inversion des données de résistivité électrique (Loke et Barker, 1996).

1.4 LES QUADRIPOLES UTILISÉS : GÉOMÉTRIE, SENSIBILITÉ ET PROFONDEUR D'INVESTIGATION

En prospection électrique de surface, il existe une centaine de configurations d'électrodes dont la grande majorité a été développée pour des usages spécifiques. Seule une vingtaine de quadripôles sont régulièrement employés et la plupart sont des dispositifs linéaires (électrodes disposées en ligne ; Szalai et Szarka, 2008). Les quadripôles ont une profondeur d'investigation et une sensibilité aux variations verticales et horizontales du milieu qui leur est propre.

Les dispositifs employés dans ces travaux sont le Wenner-Schlumberger inverse et le dipôle-dipôle pour les sections électriques et le pôle-pôle pour la diagraphie et la cartographie électrique de surface. Le Wenner-Schlumberger inverse signifie que les électrodes de potentiel sont M et N et celles de potentiels sont A et B. Le facteur géométrique et la configuration des électrodes pour chaque dispositif sont renseignés sur le Tableau 1.1 et illustrés sur la Figure 1.1. Le choix du quadripôle dépend principalement du contexte géologique des terrains prospectés, de l'objet recherché et de la sensibilité du résistivimètre utilisé (Martinaud, 1997 ; Loke, 2013).

Facteur géométrique	
Wenner-Schlumberger	$K = \pi n(n + 1)a$
Dipôle-Dipôle	$K = \pi n(n + 1)(n + 2)a$
Pôle-Pôle	$K = 2\pi a$

Tableau 1.1: Facteur géométrie des quadripôles utilisés

En prospection électrique, la profondeur d'investigation des quadripôles est déterminée à partir de la fonction de sensibilité à une dimension (1D). Cette dernière décrit l'influence de la résistivité du milieu sur la mesure de la différence de potentiel électrique. Elle est calculée pour un milieu homogène et isotrope mais fournit des informations importantes sur les spécificités des dispositifs. La fonction de sensibilité 1D correspond à la courbe caractéristique de la profondeur d'investigation du quadripôle (DIC : *depth investigation characteristic* ; Roy et Apparao, 1971). Elle représente la variation de la sensibilité avec la profondeur normalisée (ratio entre la profondeur et l'écartement inter-électrodes). Cette courbe possède un maximum localisé à des profondeurs normalisées différentes en fonction de l'écartement inter-électrodes et de la configuration du quadripôle. Selon Roy et Apparao (1971), ce maximum correspond à la profondeur d'investigation du dispositif. Cependant, la médiane de la courbe du DIC est plus proche des profondeurs d'investigation observées lors des mesures *in-situ*. Par conséquent, c'est elle qui est considérée comme la profondeur effective d'investigation du quadripôle (Edwards, 1977 ; Barker, 1989).

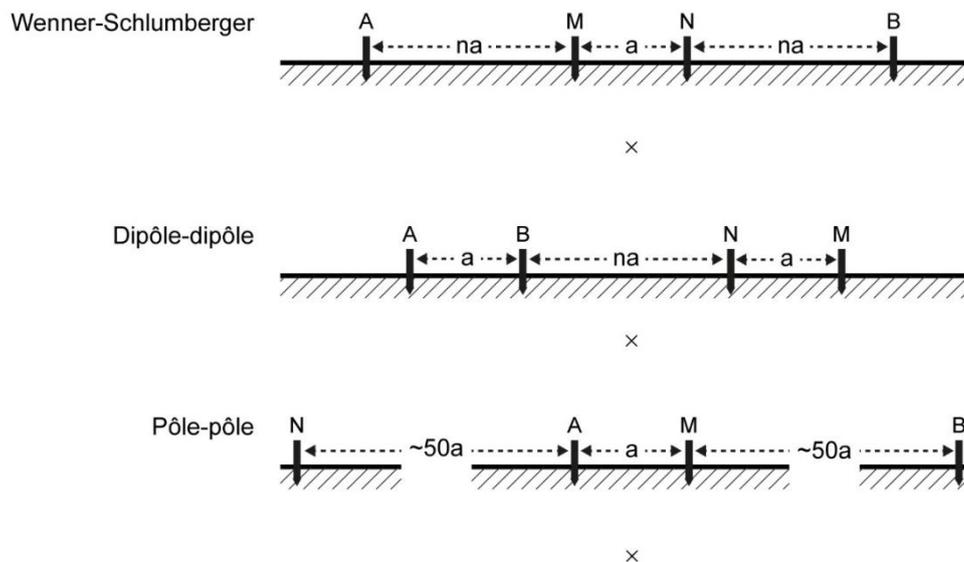


Figure 1.1 : Schéma des géométries de trois quadripôles linéaires. La profondeur effective d'investigation (x) est indiquée pour chaque quadripôle. Elle est positionnée par rapport à l'écartement relatif des électrodes.

Chaque configuration possède ses avantages et inconvénients. Comme le montre le Tableau 1.2, les dispositifs Wenner, Wenner-Schlumberger, dipôle-dipôle et pôle-pôle n'ont pas les mêmes affinités pour détecter les changements verticaux ou horizontaux de la résistivité du sous-sol. Le dispositif Wenner est bien adapté pour la détection de structures horizontales (milieu stratifié). À l'inverse, la configuration dipôle-dipôle est plus adaptée sur des structures verticales (faille, mur, etc.). Le Wenner-Schlumberger est un compromis entre le Wenner et dipôle-dipôle avec une sensibilité moyenne aux variations verticales et horizontales de la résistivité électrique. Le choix de la configuration dépend du contexte et de l'objet d'étude. Ceci sera discuté ultérieurement.

	Wenner	Wenner-Schlumberger	Dipôle-dipôle	Pôle-pôle
Sensibilité aux structures horizontales	++++	++	+	++
Sensibilité aux structures verticales	+	++	++++	+
Profondeur d'investigation	+	++	+++	+++
Couverture horizontale (pseudosection)	+	++	+++	+++
Intensité du signal	++++	+++	+	++

Tableau 1.2 : Caractéristiques des quatre quadripôles linéaires les plus utilisés en prospection électrique de surface. Les symboles (+) à (+++++) sont une évaluation qualitative de l'efficacité (faible à forte) des quadripôles pour les différentes caractéristiques (Samouëlian et al., 2005).

1.5 LA CARTOGRAPHIE DE LA RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE APPARENTE

Historiquement, la cartographie de la résistivité électrique apparente est l'une des premières méthodes de prospection géophysique appliquée à l'archéologique (Scollar et al., 1990). Elle consiste à représenter la variation spatiale de la résistivité apparente pour une profondeur d'investigation constante (l'écartement inter-électrodes est fixe). Elle est souvent réalisée selon une maille carrée dont la taille unitaire dépend des dimensions et de la profondeur des vestiges recherchés.

Pour la prospection électrique non-mécanisée, les principaux quadripôles employés sont le Wenner alpha, le Wenner Beta (analogue au dipôle-dipôle), le dispositif carré, le *twin probes* et le pôle-pôle (Martinaud, 1997). Chacun d'eux possède une profondeur d'investigation et une sensibilité propre. Le pôle-pôle est la configuration la plus régulièrement employée (Figure 1.1). Il possède une profondeur d'investigation supérieure aux autres quadripôles et il est de l'ordre de l'écartement inter-électrodes (Tableau 1.2 ; Martinaud, 1990). En termes de profondeur effective d'investigation, elle est de $0,867a$ (Figure 1.1 ; Edwards, 1977).

Pour les cartes de la résistivité apparente, la forme des structures cartographiées dépend du dispositif utilisé. En effet, les anomalies de résistivité apparente présentent des distorsions par rapport à la géométrie « réelle » des structures du sous-sol. Globalement, l'anomalie détectée présente des dimensions plus grandes que la structure à l'origine du contraste de résistivité. Ainsi, chaque quadripôle a sa propre signature électrique qui se traduit par une morphologie spécifique de l'anomalie de résistivité apparente. Le pôle-pôle occasionne moins de distorsion que les autres et la forme des anomalies possède une morphologie proche de la structure à l'origine du contraste. Néanmoins, son niveau de bruit est plus élevé que le Wenner alpha et beta, mais il est plus faible que celui du *twin probes* (Martinaud, 1990).

Pour ces différentes raisons, le dispositif pôle-pôle est utilisé pour l'acquisition des cartes de résistivité apparente. Le choix de l'écartement des électrodes AM conditionne la profondeur d'investigation, la taille minimale des structures détectables et la résolution spatiale de la carte. Plus l'écartement est grand, plus la profondeur d'investigation est importante mais au détriment de la résolution spatiale des mesures et du plus petit objet détectable. Le choix de l'écartement dépend donc des structures recherchées. Suivant le contexte géographique et archéologique, les écartements les plus répandues sont de 0,5 à 2 m (Dabas et al., 2006). La réalisation de cartes superposées obtenues à partir de mesures acquises selon différents écartements fournit une estimation de la profondeur d'apparition

des vestiges, à condition l'humidité du sol n'est pas variée entre les différentes acquisitions (Martinaud, 1990 ; Tabbagh *et al.*, 2000).

Comme illustré sur la Figure 1.1, la cartographie électrique avec le dispositif pôle-pôle consiste à installer deux électrodes mobiles sur un châssis (Figure 1.2) : une électrode d'injection (A) et une électrode de potentiel (M). Deux autres électrodes, une d'injection (B) et une de potentiel (N), sont disposées à l'infini, soit à une distance de l'ordre de 50 à 100 fois l'écartement des électrodes mobiles (Martinaud, 1990). Au cours de ces travaux, l'écartement entre les électrodes mobiles a été de 0,5 m et de 1 m. Le résistivimètre utilisé est un RM15 (*Geoscan Research*), un instrument spécialement conçu pour l'archéologie. Les prospections sont réalisées selon une maille carrée dont le côté correspond à l'écartement inter-électrode des mobiles (AM). Les données sont acquises dans un référentiel local et le carroyage est relevé par une station totale, puis géoréférencé dans un repère géographique.

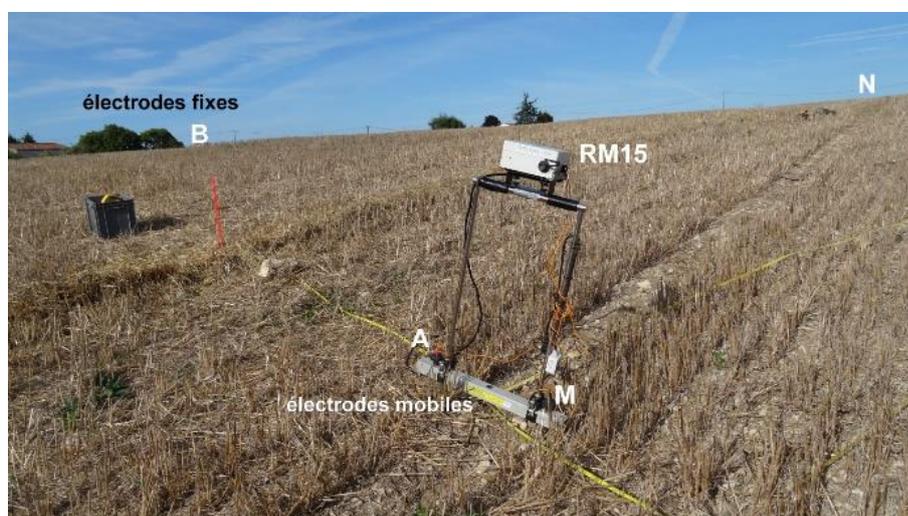


Figure 1.2 : RM15 (*Geoscan Research*) monté sur son châssis avec les électrodes mobiles d'injection (A) et de potentiel (M). Les deux autres, B et N, sont disposées à l'infini. Sur cette image, l'écartement inter-électrodes est 0,5 m.

Les données sont interpolées par une triangulation linéaire pour obtenir une carte de la résistivité apparente avec une maille unitaire correspondant à l'écartement inter-électrodes. La méthode d'interpolation est adaptée car les mesures sont espacées d'un pas constant selon les deux axes orthogonaux du carroyage. Une fois interpolée, la carte de résistivité apparente est lissée par une médiane glissante sur neuf pixels (3x3). Ceci permet d'éliminer les erreurs d'acquisition liées, entre autres, à des mauvais contacts avec le sol.

1.6 LA SECTION DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

1.6.1 Acquisition des mesures

La section de résistivité électrique (ERT en anglais : Electrical Resistivity Tomography) est un modèle de la répartition des résistivités « vraies » de la subsurface selon un plan vertical : c'est le résultat

de l'inversion d'une pseudosection de résistivité électrique apparente. La pseudosection est acquise par l'implantation de plusieurs dizaines d'électrodes, espacées d'un écartement constant le long d'un profil linéaire. L'objectif est de réaliser une séquence de mesures de résistivité apparente avec une ou plusieurs configurations de quadripôles. Plusieurs combinaisons d'écartement inter-électrodes sont effectuées permettant d'obtenir des informations sur la variation verticale de la résistivité du milieu. Ainsi, une première séquence de mesure avec un écartement de « a » le long du profil est effectuée en déplaçant le quadripôle d'électrode en électrode, puis des nouvelles séquences avec 2a, 3a, 4a, etc. (Figure 1.3). Sachant que plus l'écartement est grand, plus le volume d'intégration de la mesure est important, plus la résolution est faible (plus petit objet détectable). De ce fait, des petites structures proches de la surface auront une forte contribution sur la résistivité apparente réalisée avec un petit écartement. En revanche, des grandes structures profondes influenceront les mesures effectuées avec un grand écartement mais les petites structures de surface auront une très faible contribution. Ainsi, la résolution de la pseudosection décroît avec l'augmentation de l'écartement inter-électrodes et donc avec la profondeur.

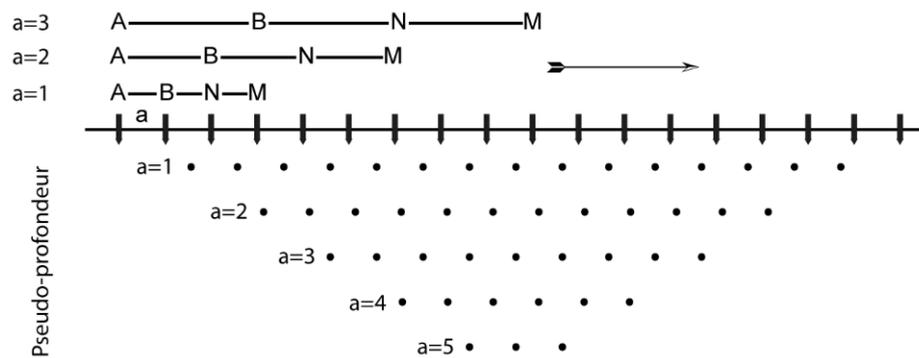


Figure 1.3 : Représentation schématique de l'acquisition d'une pseudosection de résistivité électrique apparente. Le quadripôle est le dipôle-dipôle ($n=1$).

Chaque mesure de résistivité apparente est représentée sur la pseudosection : la position de la mesure le long du profil (axe horizontal « x ») correspond au centre du quadripôle (valable pour les dispositifs linéaires standards) et sa position selon l'axe vertical « z » correspond à la profondeur effective d'investigation (Edwards, 1977). Plusieurs représentations de la pseudosection existent, celle détaillée ci-dessus est celle utilisée par le logiciel d'inversion *Res2Dinv* (Loke, 2014). La pseudosection ne décrit donc pas la géométrie des résistivités de la subsurface mais correspond à une représentation des mesures de résistivité apparente (Figure 1.4a). L'axe vertical « z » correspond à une pseudo-profondeur (Ps.Z).

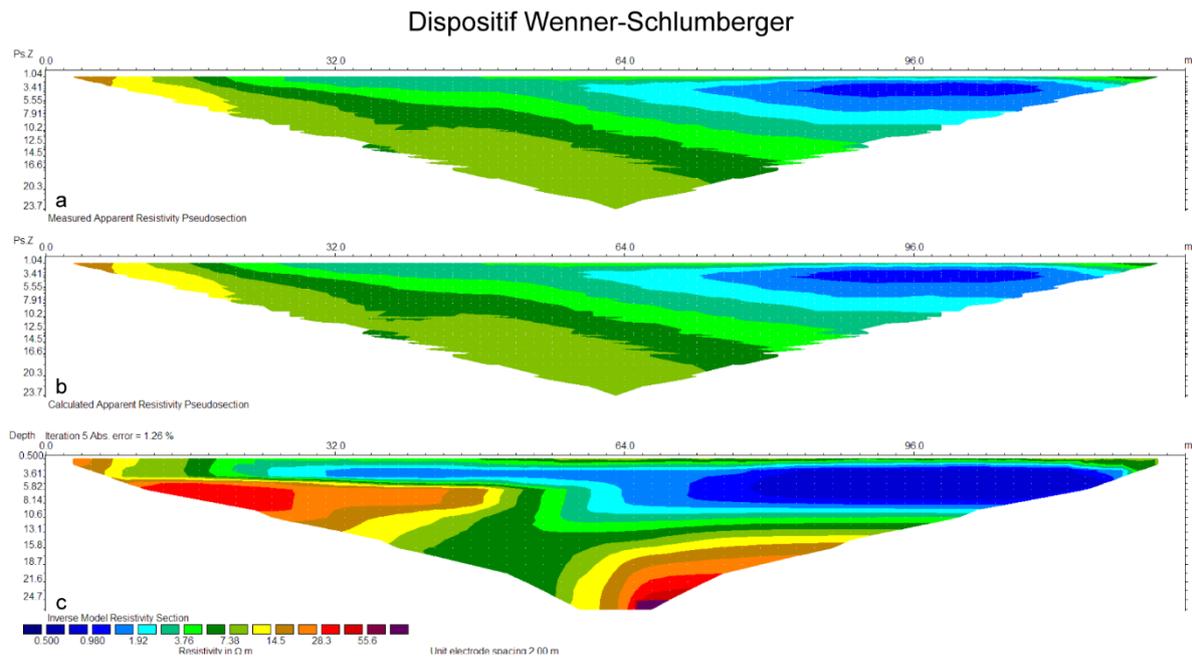


Figure 1.4 : Illustration du processus de l'inversion des données de résistivité électrique (Res2Dinv). (a) Pseudosection de résistivité apparente mesurée. (b) Pseudosection de résistivité apparente calculée. (c) Section de résistivité « vraie » ou modèle de résistivité de la subsurface.

Au cours de cette étude, les pseudosections ont été acquises avec un jeu de 64 électrodes raccordées à deux câbles multiprises (flûtes) qui sont connectés à un résistivimètre Terrameter LS (ABEM ; Figure 1.5). Ce résistivimètre à 12 voies permet une relative rapidité d'acquisition des données de résistivité apparente en réalisant plusieurs mesures de différence de potentiel électrique à partir d'un seul couple d'électrode d'injection. De plus, l'acquisition des mesures avec différentes configurations de quadripôle est possible pour une même pseudosection. Les dispositifs utilisés pour la section électrique sont le Wenner-Schlumberger inverse et le dipôle-dipôle (Figure 1.1).

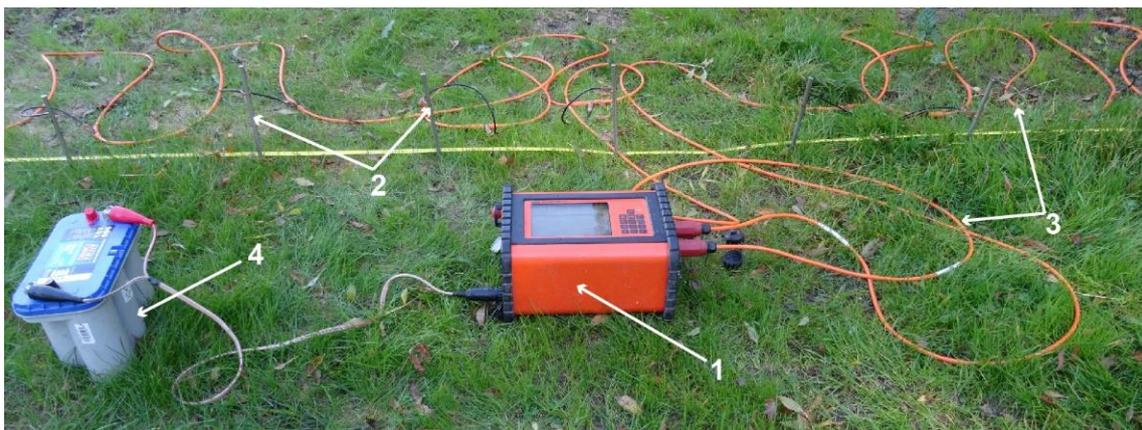


Figure 1.5 : Résistivimètre Terrameter LS (1 ; ABEM) raccordé à 64 électrodes (2) par deux câbles multiprises (3). L'alimentation correspond à une batterie standard de 12 V (4).

1.6.2 Archéologie et géomorphologie : choix du quadripôle

La fonction de sensibilité décrite précédemment à une dimension pour déterminer la profondeur effective d'investigation peut aussi être exprimée à deux dimensions. Elle décrit l'influence de la résistivité du milieu sur la mesure de la différence de potentiel électrique selon un plan vertical (Loke et Barker, 1995). Les sensibilités des quadripôles Wenner-Schlumberger et dipôle-dipôle sont représentées sur la Figure 1.6 et sont uniquement valables pour un milieu homogène et isotrope.

Les sensibilités des deux dispositifs présentent de fortes valeurs à proximité des électrodes impliquant qu'une petite perturbation à proximité de celle-ci (par exemple : un bloc calcaire) aura une influence non-négligeable sur la mesure de potentiel. Dans le Tableau 1.2, les deux dispositifs montrent des caractéristiques différentes pour la détection des structures horizontales et verticales, reconnaissables sur la représentation de la sensibilité à 2D (Figure 1.6). Pour un écartement normal ($n = 1$), le Wenner-Schlumberger possède une forte sensibilité répartie horizontalement sous l'ensemble du quadripôle. Ceci implique une bonne détection des contrastes verticaux de la résistivité, soit des structures horizontales. A l'inverse, le dipôle-dipôle possède une sensibilité très concentrée sous les deux dipôles AB et MN avec une répartition resserrée verticalement. Il est efficace pour détecter des contrastes horizontaux de résistivité, soit des structures verticales (Oldenburg et Li, 1999 ; Dahlin et Zhou, 2004). Cette caractéristique se distingue plus nettement avec les arrangements où le paramètre « n » augmente car la sensibilité du dipôle-dipôle est très concentrée sous les deux dipôles. Les inconvénients du dipôle-dipôle sont une perte du signal importante avec l'augmentation de l'écartement et un niveau de bruit plus élevé (Dahlin et Zhou, 2004 ; Loke, 2013). Cependant, les nouveaux résistivimètres, tels que le Terrameter LS (*ABEM*) ayant une précision de l'ordre du nanovolts (Moberg, 2012), permettent de mesurer de très faibles variations du potentiel électrique compensant ainsi la perte du signal. Le ratio signal/bruit est amélioré en limitant le paramètre « n » à 5 du dipôle-dipôle (Dahlin et Zhou, 2004).

Avec l'augmentation du paramètre « n », le Wenner-Schlumberger présente une répartition de la sensibilité plus verticale et se rapproche de celle du dipôle-dipôle. Cette caractéristique montre que le Wenner-Schlumberger (en variant le paramètre « n » et l'écartement « a ») possède une sensibilité moyenne aux contrastes horizontaux et verticaux de résistivité (Samouëlian et *al.*, 2005 ; Loke, 2013). De plus, il a une profondeur d'investigation légèrement supérieure au Wenner et au dipôle-dipôle (Edwards, 1977) et une résolution verticale plus homogène que ce dernier (Dahlin et Zhou, 2004). Le Wenner-Schlumberger est un bon dispositif avec un compromis convenable entre sensibilité horizontale et verticale (Samouëlian et *al.*, 2005). Ainsi, il est bien adapté pour des prospections où la géométrie de la subsurface est peu connue.

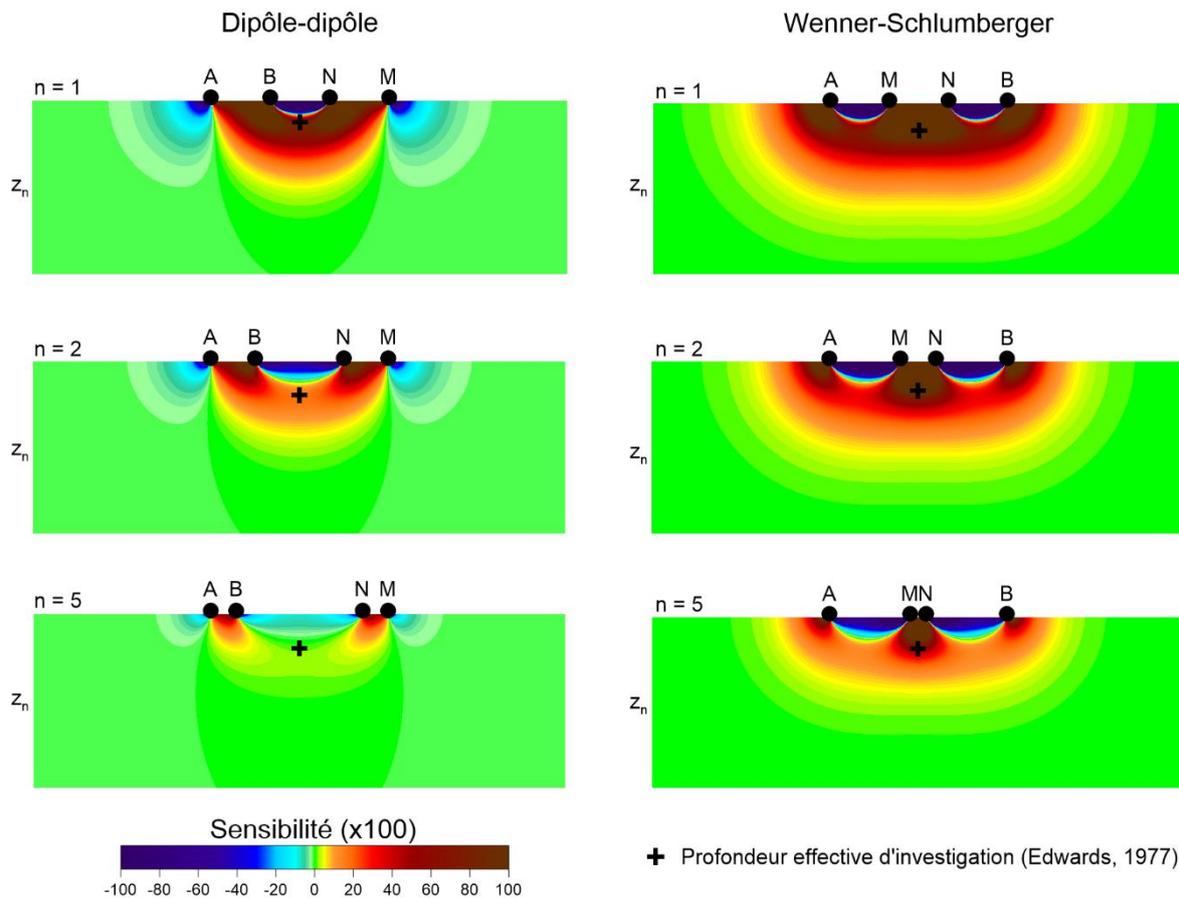


Figure 1.6 : Représentation de la sensibilité du dispositif dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger pour trois arrangements différents (générée sous Res2Dmod). Les profondeurs sont normalisées en fonction de la longueur totale L du dispositif ($z_n=z/L$) ainsi l'axe horizontale.

Dans ces travaux, les structures recherchées sur les sites archéologiques avec les sections de résistivité électrique sont principalement des fossés et des structures portuaires linéaires (digues, quais). Schématiquement, les bordures latérales de ces structures possèdent des contrastes de résistivité verticaux avec leur encaissant. Le dipôle-dipôle est donc le plus approprié pour les délimiter. De plus, il possède une bonne couverture verticale des mesures et une bonne résolution dans les deux premiers tiers de la pseudosection (Dahlin et Zhou, 2004 ; Samouëlian et *al.*, 2005 ; Tableau 1.2). La rapidité d'acquisition du dipôle-dipôle est un autre avantage pour son utilisation en contexte archéologique. En effet, pour une même séquence d'injection, plusieurs mesures simultanées de différence de potentiel électrique sont effectuées avec les nouvelles générations de résistivimètre tel que le Terrameter LS. De plus, Berge et Drahor (2011) montrent que le dipôle-dipôle est l'une des configurations la plus adaptée pour caractériser les structures archéologiques.

En contexte géomorphologique, les structures sont à la fois horizontales (couches sédimentaires et géologiques) et verticales (paléo-chenaux). Pour obtenir une restitution optimale de ces dernières, la combinaison des dispositifs Wenner-Schlumberger et dipôle-dipôle est privilégiée. Le Wenner-Schlumberger compense ainsi la perte de résolution du dipôle-dipôle avec la profondeur et sa faiblesse pour la détection des structures horizontales.

1.6.3 Inversion des données de résistivité électrique

La pseudosection de résistivité électrique apparente n'est qu'une représentation des mesures. C'est une image déformée de la répartition des résistivités de la subsurface. Afin de retrouver la géométrie originelle des structures et les valeurs de résistivités « vraies », une inversion des résistivités apparentes est effectuée. Les inversions ont été réalisées avec le logiciel *Res2Dinv* (*Geotomo Software*) qui utilise un algorithme d'inversion itératif basé sur la *méthode des moindres carrés à lissage contraint* (Loke et Barker, 1996 ; Loke et al., 2003 ; Loke, 2014).

Le principe de l'inversion est de proposer un modèle des résistivités « vraies » cohérent avec la pseudosection de résistivité apparente mesurée *in-situ*. Le modèle correspond à une discrétisation par blocs de dimensions décroissantes avec la profondeur (représentation de la perte de résolution). Chaque bloc contient une information de résistivité « vraie ». Une fois les paramètres initiaux entrés (taille et nombre de blocs, nombre d'itération, paramètre de lissage, etc.), l'algorithme propose un modèle initial par une *méthode d'optimisation par moindres-carrés à lissage contraint non-linéaire* qui détermine une valeur de résistivité pour chaque bloc (Loke et Barker, 1996 ; Loke, 2014) : c'est la résolution du problème inverse. Le modèle (Figure 1.4c) est évalué, dans un premier temps, par la simulation d'injection de courant électrique et de mesures de différence de potentiel électrique pour générer une pseudosection de résistivité apparente calculée : c'est le problème direct. La résolution du problème direct est effectuée par la *méthode des éléments finis*. Dans un second temps, les résistivités apparentes calculées (Figure 1.4b) sont comparées aux résistivités apparentes mesurées (Figure 1.4a). Le critère de confiance est une faible différence entre ces deux dernières, calculées par une erreur quadratique moyenne (RMS : root mean square error).

Si l'erreur est trop importante, une nouvelle itération est lancée. Un nouveau modèle est alors proposé. Une *équation de Gauss-Newton* (Loke et Barker, 1996) détermine les changements à apporter aux paramètres du modèle pour réduire cette erreur RMS. Le problème direct est de nouveau résolu pour évaluer la pseudosection calculée par rapport à la mesurée. Ce processus itératif se poursuit jusqu'à ce que la convergence soit atteinte, c'est-à-dire que l'erreur RMS soit acceptable (inférieure à 5 %). Une fois atteinte, le modèle proposé de la géométrie des résistivités « vraie » de la subsurface est associable à la pseudosection mesurée. Une fois le processus d'inversion terminée, le modèle proposé correspond à une section de résistivité électrique (Figure 1.4c). Sur le modèle, la profondeur des structures est une estimation qui dépend de la qualité du modèle et de la résolution (écartement inter-électrodes utilisé).

Néanmoins, l'unicité de la solution n'existe pas et un modèle correspond à une solution parmi d'autres. De multiples raisons sont à l'origine de la non-unicité. En voici certaines (Günther, 2004 ; Fargier, 2011) :

- Le modèle proposé est une représentation 2D alors que la pseudosection est réalisée dans un environnement à trois dimensions. De ce fait, le modèle ne tient pas compte des variations latérales de résistivité (perpendiculaire à la pseudosection) ;
- Les erreurs de mesures liées à l'acquisition sont difficilement quantifiables ;
- Le paramétrage initial du modèle est mal effectué.

1.7 LA DIAGRAPHIE ÉLECTRIQUE

La diagraphie électrique consiste à réaliser un profil vertical (1D) de la résistivité électrique de la subsurface. Initialement développé et encore utilisé pour la recherche géologique et pétrolière (Roy, 1975 ; Fitch, 1982 ; Spies, 1996 ; Asfahani, 2011, 2014), la diagraphie électrique est appliquée à d'autres domaines s'intéressant à des phénomènes de subsurface comme l'étude des sites et sols pollués (Fukue *et al.*, 2001 ; Yoon et Park, 2001 ; Simoni et Vannucchi, 2006 ; Kim *et al.*, 2009), la géotechnique (Lech *et al.*, 2008) et l'étude des sols (Bernard-Ubertosi *et al.*, 2009 ; Kowalczyk *et al.*, 2014). Plus récemment, elle s'ancre dans des études paléoenvironnementales où elle est utilisée comme un outil précis de reconnaissance des variations sédimentaires, en complément des sections électriques et des interprétations stratigraphiques des carottages (Fischer *et al.*, 2016).

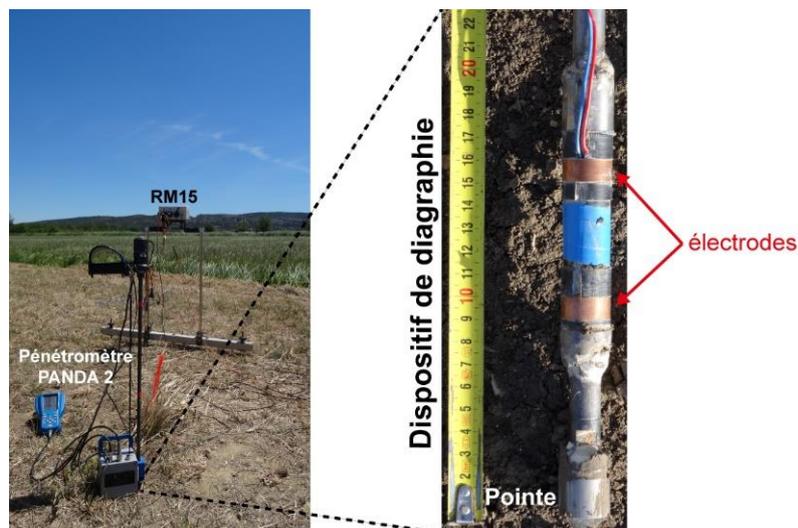


Figure 1.7 : Dispositif de diagraphie. Assemblage de deux électrodes sur le train de tige du pénétromètre PANDA® 2. Les électrodes sont connectées au résistivimètre RM15.

Le dispositif de diagraphie, mis au point par mes soins et employé dans ces travaux, correspond à deux électrodes mobiles, une d'injection (A) et une de potentiel (M), fixées au train de tige d'un pénétromètre dynamique de type PANDA® 2 (voir description dans la sous-partie 4) et espacées de 5 cm (Figure 1.7). Deux électrodes fixes (B et N) sont situées à la surface à plus de 5 m des deux autres. La configuration est un pôle-pôle adaptée à la mesure en diagraphie, appelé aussi configuration normale ou de potentiel (Schlumberger *et al.*, 1934 ; Spies, 1996 ; Furche et Weller, 2002). Ces quatre électrodes sont raccordées à un résistivimètre RM15 (*Geoscan Research*).

Les électrodes mobiles sont enfoncées progressivement dans le sol et les mesures de résistivité sont effectuées au fur et mesure de l'enfoncement. Cette méthode de diagraphie est dite *Direct-push electrical logging* (Christy et al., 1994 ; Schulmeister et al., 2003). Comme pour le pôle-pôle en cartographie de résistivité apparente, la profondeur d'investigation (appelée ici rayon d'investigation ; Roy, 1975) est de l'ordre de l'écartement entre les électrodes mobiles (Edwards, 1977 ; Martinaud, 1990). Puisque le dispositif est enfoncé dans le sol, le milieu ne peut plus être considéré comme un demi-espace. De ce fait, le facteur géométrique du pôle-pôle est multiplié par deux (Tableau 1.1 ; Bernard, 2006). Le rayon d'investigation étant très faible (volume de quelques cm³), la mesure de la résistivité apparente peut être considérée comme la mesure de la résistivité « vraie ». Le profil électrique présente donc la variation de la résistivité en fonction de la profondeur en une position donnée.

La sensibilité de la configuration normale n'est pas exactement la même que celles des quadripôles utilisés en carte ou en section électrique. La sensibilité en diagraphie électrique dépend du contraste de résistivité entre la résistivité du fluide présent dans le sondage et celle du sédiment (Furche et Weller, 2002). Pour les sondages pétroliers, l'injection d'un fluide dans le forage, pour faciliter la perforation, modifie la résistivité du fluide interstitiel de la roche. Ceci entraîne un contraste de résistivité important entre le bord du forage et la roche (Roy et Dutta, 1997). Néanmoins, dans le contexte de ces travaux, le fluide dans le sondage correspond à la solution du sol. Dans le cas où la salinité de l'eau interstitielle est élevée, la résistivité électrique mesurée est principalement influencée par la solution du sol (Choo et Burns, 2014). De ce fait, le contraste est faible entre les deux interfaces. La sensibilité de la configuration normale possède ainsi des caractéristiques similaires au pôle-pôle (Tableau 1.2).

La diagraphie électrique est une méthode permettant d'acquérir des informations précises, à l'échelle de la lamine sédimentaire, sur les contrastes de résistivité entre les différents milieux traversés (Schulmeister et al., 2003 ; Sellwood et al., 2005 ; Fischer et al., 2016). Elle est complémentaire de la section de résistivité électrique. En effet, les diagraphies sont réalisées en parallèles des sections électriques pour vérifier la robustesse du modèle en termes de variations verticales et de valeurs de résistivité estimée (en tenant compte des différence de volume d'investigation entre les deux méthodes ; Fischer et al., 2016).

1.8 ERREURS SUR LA RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE APPARENTE MESURÉE

Les erreurs sur la mesure de la résistivité apparente sont très documentées pour les sections électriques. En effet, l'objectif de l'inversion des données électriques est d'acquérir un modèle très proche de la « réalité » du terrain prospecté. Cela sous-entend que la pseudosection de résistivité apparente soit la moins possible entachée d'erreurs et que leurs sources soient clairement identifiées. Néanmoins, les études faites sur ces erreurs sont transposables en partie pour les autres méthodes

électriques. Deux thèses présentent très bien les différentes sources d'erreur de mesure en tomographie électrique : la thèse de Günther (2004) intitulée *Inversion methods and resolution analysis for the 2D/3D reconstruction of resistivity structures from DC measurements* et la thèse de Fargier (2011) intitulée *Développement de l'imagerie de résistivité électrique pour la reconnaissance et la surveillance des ouvrages hydrauliques en terre*.

Une source d'erreur évidente est la mauvaise position des électrodes le long du profil de la section électrique : la constance de l'écartement entre les électrodes n'est plus respectée. Cette erreur implique un facteur géométrique non-cohérent avec l'arrangement des électrodes, induisant des valeurs aberrantes (pour une forte déviation de l'électrode) ou du bruit (faible déviation) dans la pseudosection de résistivité apparente. Une erreur de position de 10 % sur la position d'une électrode le long du profil peut engendrer une erreur de 20 % sur le facteur géométrique et donc sur la résistivité apparente (Zhou et Dahlin, 2003 ; Razafindratsima et Lataste, 2014). Ces erreurs se rencontrent sur des terrains avec une topographie marquée. En effet, la topographie, et en particulier au niveau des ruptures de pente, entraîne des erreurs de positionnement car l'écartement constant dans le plan horizontal n'est pas respecté. Dans le cas d'ouvrages hydrauliques avec de fortes pentes (digue), ce biais de positionnement peut engendrer une erreur de 200 % sur le facteur géométrique (Fargier, 2011). Suivant les contraintes du terrain (comme une végétation dense ou une forte topographie), le respect absolu de l'écartement constant est difficilement réalisable. Dans des conditions particulières de forte densité de végétation, des erreurs sur le facteur géométrique et sur la résistivité apparente seront introduites (Figure 1.8). Néanmoins, les valeurs aberrantes résultantes de ces erreurs sont corrigées ou supprimées en post-traitement pour acquérir une bonne qualité du modèle de résistivité (Fargier, 2011 ; Tsourlos et *al.*, 2014 ; Mathé et *al.*, 2016).



Figure 1.8 : Section électrique effectuée dans la salicorne. L'hexamètre (flèches jaunes) épouse la morphologie de la végétation impliquant de possibles erreurs de positionnement des électrodes.

La présence de courants telluriques et anthropiques dans le sol peut introduire des erreurs sur les résistivités apparentes mesurées. Les courants telluriques ont des effets non-négligeables sur les mesures de différence de potentiel électrique quand l'écartement inter-électrodes est supérieur à 100 m (Fargier, 2011). Pour ces travaux, ces courants sont considérés comme négligeables car l'écartement maximum utilisé est de 60 m. Pour les courants d'origine anthropique, la plupart des résistivimètres modernes ont un filtre à 50 Hz, ce qui est le cas du résistivimètre utilisé (Moberg, 2012).

Les électrodes peuvent présenter une polarisation si elles ont injecté un courant électrique en amont. Ceci introduit une erreur dans la mesure de différence de potentiel (Dahlin, 2000). Les résistivimètres modernes exécutent une séquence complexe d'injection de courant et un cycle de plusieurs mesures de potentiel pour inhiber la polarisation des électrodes et limiter au maximum l'erreur sur la mesure (Moberg, 2012).

2 LA PROSPECTION MAGNÉTIQUE

2.1 GÉNÉRALITÉS

Cette courte synthèse non exhaustive sur le magnétisme a été réalisée à partir des ouvrages de référence de Thompson et Oldfield (1986), Reynolds (1997), du Trémolet de Lacheisserie et *al.* (1999) et Telford et *al.* (2004) et pour la prospection magnétique appliquée à l'archéologie à partir des ouvrages de Scollar et *al.* (1990) et d'Aspinall et *al.* (2008).

2.1.1 Principes fondamentaux

Le champ magnétique est une grandeur vectorielle noté H qui s'exprime en ampères par mètre (A/m). La densité de flux magnétique, notée B , est définie comme le flux magnétique par unité surface qui s'exprime en weber par mètre carré (Wb/m²) dans le système C.G.S. et en tesla (T) dans les unités du système international (SI). Dans le cas du champ magnétique terrestre, l'unité appropriée est le nanotesla (1 nT = 10⁻⁹ T). La densité de flux magnétique B correspond à l'induction magnétique. Elle s'exprime en fonction de la perméabilité magnétique du vide ($\mu_0 = 10^{-7}$ Tm/A) et absolue du milieu (μ) et du champ magnétique selon la relation (valable uniquement pour un milieu homogène et isotrope) :

$$\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H} \quad \text{avec} \quad \mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Eq. 2.1

Si un matériau ayant la capacité de s'aimanter est positionné dans un milieu avec un champ magnétique externe de faible intensité (comme celui de la Terre), il acquerra une aimantation dite induite. En l'absence de ce champ externe, l'aimantation induite M (A/m) au sein du matériau disparaît.

Cette aimantation est définie par son moment magnétique m (A.m²) par unité de volume (V) du matériau. L'aimantation induite est proportionnelle et parallèle au champ magnétique externe H selon :

$$\vec{M} = k\vec{H} \quad \text{avec} \quad \vec{M} = \frac{\vec{m}}{V}$$

Eq. 2.2

Le facteur de proportionnalité k (scalaire) est la susceptibilité magnétique du matériau. La relation linéaire entre l'aimantation et le champ n'est vraie que pour des matériaux homogènes et isotropes¹. Dans le cas d'une relation non-linéaire, la susceptibilité se définit comme la pente à l'origine de l'aimantation en fonction du champ magnétique appliqué. Ainsi, la susceptibilité magnétique exprime la capacité du matériau à acquérir une aimantation induite en présence d'un champ magnétique externe. Cette propriété est une grandeur sans dimension dans les unités du système international. Elle est importante en prospection magnétique car elle conditionne la réponse magnétique des différents constituants du sol et des structures archéologiques. Ainsi, l'induction magnétique B s'exprime avec le champ magnétique externe H et l'aimantation M . À partir des relations Eq. 2.1 et Eq. 2.2, il est alors possible d'écrire :

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0\vec{H}(1 + k)$$

Eq. 2.3

En l'absence de champ magnétique externe, certains matériaux conservent une aimantation non-nulle, appelée aimantation rémanente. La prospection magnétique de surface est basée sur le contraste d'aimantation entre une structure naturelle ou anthropique et son encaissant. Selon la nature de la structure, l'aimantation de celle-ci a une composante induite (liée et proportionnelle au champ terrestre) et peut avoir une composante rémanente. Le contraste d'aimantation d'un matériau avec son encaissant engendre une composition locale du champ magnétique total. La densité de flux magnétique B_i du matériau s'ajoute à celle du champ terrestre $B_{\text{terrestre}}$ pour donner une densité de flux totale :

$$\vec{B}_{\text{totale}} = \vec{B}_{\text{terrestre}} + \vec{B}_i$$

Eq. 2.4

La densité de flux totale est appelée champ magnétique total (en dehors de l'étude du comportement de la matière aimantée, la distinction entre l'induction B et le champ H n'est pas nécessaire). Généralement, la prospection magnétique mesure l'intensité du champ magnétique total qui est la combinaison du champ terrestre et du champ local. Ce dernier est issu de l'aimantation du sol et des matériaux qui le composent, comme par exemple des structures archéologiques. La détectabilité

¹ Dans le cas de matériau anisotrope, la susceptibilité magnétique correspond à un tenseur, appelé tenseur de susceptibilité.

d'une structure (anomalie locale) dépend directement du contraste d'aimantation (ou de susceptibilité) entre elle et son encaissant (généralement le sol).

Par rapport à l'intensité du champ terrestre, les anomalies locales sont très faibles. De plus, les vents solaires liés à l'activité du soleil induisent des variations temporelles du champ terrestre. Pour ces raisons, l'analyse directe et l'interprétation du champ total est difficile. Le retrait du « champ terrestre » du « champ total » permet d'extraire les anomalies magnétiques locales. Plusieurs méthodes sont possibles pour s'affranchir de la variation temporelle du champ terrestre. Elles seront présentées ultérieurement.

2.1.2 Les comportements magnétiques

Le comportement magnétique de la matière et des minéraux est lié à la répartition des électrons sur les orbitales de l'atome et de leurs spins. Suivant les moments magnétiques élémentaires des atomes composant les matériaux, plusieurs comportements magnétiques existent dont les principaux sont le diamagnétisme, le paramagnétisme, le ferromagnétisme, l'antiferromagnétisme et le ferrimagnétisme.

Sous un champ magnétique externe (tel le champ magnétique terrestre), les matériaux diamagnétiques acquièrent une très faible aimantation induite parallèle mais opposée au champ appliqué. Leur susceptibilité magnétique est faible et négative (de l'ordre de -10^{-5} SI). La grande majorité des matériaux sont diamagnétiques comme les feldspaths, le quartz, la calcite, l'eau et le bois.

En présence d'un champ externe, les matériaux paramagnétiques acquièrent une faible aimantation induite colinéaire et dans le même sens que le champ externe. Cette aimantation est plus forte que celles des matériaux diamagnétiques. Les matériaux paramagnétiques ont une susceptibilité magnétique faible et positive (entre 10^{-3} et 10^{-5} SI). Les minéraux argileux, les silicates ferromagnésiens et les carbonates (ayant une substitution du calcium par des métaux de transition comme la sidérite) possèdent des comportements paramagnétiques.

Les minéraux ferromagnétiques sens large (s.l.), antiferromagnétiques et ferrimagnétiques peuvent avoir une aimantation permanente même en l'absence de champ externe (rémanence). Ils ont une susceptibilité magnétique forte. Les ferromagnétiques sens stricts (s.s.) ont des moments magnétiques élémentaires parallèles et alignés dans le même sens. Ils ont une forte aimantation rémanente, comme le fer.

Les minéraux antiferromagnétiques, comme l'hématite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) et la goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$), possèdent des moments magnétiques élémentaires alignés de manière antiparallèle. En théorie, ces moments s'annulent deux à deux et l'aimantation résultante est nulle. En pratique, l'hématite a un comportement antiferromagnétique dévié impliquant que les moments ne sont pas parallèles mais présente une déviation entre les sous-réseaux cristallins. Ceci induit un ferromagnétisme faible résultant

de la « manifestation d'interaction d'échange antisymétrique » (du Trémolet de Lacheisserie et *al.*, 1999).

Les minéraux ferrimagnétiques ont aussi des moments magnétiques alignés de manière antiparallèle mais d'intensité différente. L'aimantation résultante est forte mais plus faible que celle des ferromagnétiques s.s. La magnétite (Fe_3O_4) et les sulfures de fer tels que la greigite (Fe_3S_4) ont des comportements ferrimagnétiques.

Dans un grain ferromagnétique s.l., l'orientation des moments élémentaires n'est pas nécessairement le même dans l'ensemble du grain. Un grain peut être divisé en plusieurs domaines magnétiques, appelés domaines de Weiss. Un domaine correspond à une fraction de volume avec des moments élémentaires de même orientation. Les moments ne possèdent pas nécessairement la même direction d'un domaine à un autre et les transitions d'orientation entre les domaines voisins correspondent aux parois de Bloch.

Les gros grains (supérieurs aux μm) sont généralement polydomaines. Chaque domaine possède une forte aimantation rémanente mais l'aimantation totale du grain (à échelle macroscopique) peut être relativement faible. Ceci est induit par un effet de compensation de l'aimantation entre les domaines. Les grains monodomaines concernent principalement les grains fins. Leurs aimantations rémanentes sont souvent plus fortes et plus stables que les grains polydomaines.

Les grains très fins monodomaines ferri- et antiferromagnétiques (entre 1 et 10 nm, environ 30 nm pour la magnétite) possèdent un comportement similaire au paramagnétisme (à température ambiante) car ils s'orientent dans le sens et la direction du champ magnétique appliqué. Ce comportement correspond au superparamagnétisme et l'aimantation induite résultante est forte.

Les comportements magnétiques, la taille et la forme des grains sont des paramètres (parmi d'autres non présentés) qui influencent l'intensité de l'aimantation induite et rémanente du matériau.

2.1.3 Les aimantations rémanentes

Les roches, les sédiments et les sols possèdent des minéraux porteurs de signaux magnétiques d'intensité variable suivant leurs susceptibilités. Certains minéraux ont une aimantation naturelle rémanente. Cette dernière persiste même en l'absence d'un champ magnétique externe. L'aimantation rémanente d'un minéral, d'une roche ou d'un matériau porte la même orientation que le champ appliqué au moment de sa formation et son intensité est proportionnelle à l'intensité de ce champ. Différents processus permettent à un minéral, une roche ou à un matériau d'acquérir une aimantation rémanente naturelle :

- L'aimantation thermorémanente (ATR) est une aimantation acquise lorsque qu'un matériau refroidit après avoir été chauffé au-delà de la température de déblocage

des minéraux magnétiques qu'il contient (température de Curie, ou de Néel pour les minéraux antiferromagnétiques). L'ATR dépend des minéraux composant le matériau ;

- L'aimantation rémanente détritique : orientation des minéraux magnétiques selon le champ magnétique terrestre lors de leurs décantations et de leurs dépôts. Leurs orientations sont conservées en l'absence de perturbation ;
- L'aimantation chimique : acquise lors de la formation de petits cristaux magnétiques à basse température.

2.2 LES PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DU SOL

Les sols possèdent des propriétés magnétiques qui dépendent du type de minéraux magnétiques, de la taille des grains et de leurs concentrations. Suivant la lithologie de la roche-mère, les propriétés magnétiques du sol sont issues à la fois de minéraux magnétiques hérités de cette dernière et surtout de phases magnétiques néoformées lors de la pédogénèse (Maher, 1998). Sur un substrat calcaire (peu magnétique), les minéraux porteurs du signal magnétique sont principalement néoformés lors des processus pédogénétiques mais aussi par l'action du feu (cultures sur brûlis et incendies) et par les activités anthropiques (Le Borgne, 1960 ; 1965 ; Tite et Mullins, 1971 ; Thompson et Oldfield, 1986 ; Maher, 1998 ; Fassbinder et *al.*, 1990).

Les minéraux porteurs du signal magnétique sont principalement des ferrimagnétiques présents dans la matrice ultrafine du sol (Maher et Taylor, 1988). Leur proportion est très faible, généralement inférieure à 0,1 % (Maher, 1998). L'hématite, la magnétite, la maghémite et la goethite sont les minéraux les plus souvent rencontrés et leurs concentrations dépendent des conditions d'oxydo-réduction du milieu et de la roche-mère. L'hématite et la maghémite (oxydes de fer) et la goethite (oxyhydroxyde de fer) sont caractérisées par un état oxydé du fer (Fe^{3+}). La magnétite présente par un réseau cristallin composé par des atomes de fer à l'état réduit (Fe^{2+}) et oxydé. L'hématite a une susceptibilité magnétique plus faible que la magnétite et la maghémite. Les aimantations induites et rémanentes de chaque constituant du milieu (phases magnétiques dans le sol, mobiliers archéologiques...) conditionnent le contraste d'aimantation entre le sol et une structure archéologique.

L'enrichissement en minéraux magnétiques d'un sol développé sur une roche-mère peu magnétique (comme un calcaire) se fait selon différents processus naturels et artificiels (influence des activités humaines). Le Borgne (1960, 1965) montre que l'action du feu (incendies, foyers...) favorise la réduction de l'hématite en magnétite puis une réoxydation de cette dernière en maghémite lors du refroidissement. Ceci induit une augmentation de la susceptibilité magnétique du sol. La présence de l'homme apporte des minéraux magnétiques aussi par l'action du feu (foyer, culture sur brûlis) ainsi que par des matériaux ayant une aimantation rémanente comme les céramiques, les briques ou les scories

(Tite et Mullins, 1971 ; Weston, 2002). Une occupation anthropique implique aussi une compaction du sol augmentant artificiellement la concentration en oxyde de fer (Tite et Mullins, 1971). Néanmoins, Mathé et Lévêque (2003) montrent que la compaction du sol peut générer un signal magnétique plus faible que l'encaissant par la modification des conditions d'aération affectant les phases magnétiques.

L'apport de matière organique par la dégradation des végétaux et des déchets organiques liés à une occupation anthropique sont des vecteurs d'augmentation du signal magnétique du sol. Lors de la fermentation de la matière organique par des bactéries, les conditions d'oxydo-réduction du sol sont modifiées. Suivant que les conditions soient réductrices ou oxydantes, la concentration en oxydes de fer à l'état réduit (magnétite) ou oxydé (maghémite) est plus importante (Fassbinder et Stanjek, 1993 ; Linford, 2004 ; Glaser et Birk, 2012). L'enrichissement du sol en magnétite se fait aussi par certaines bactéries réductrices du fer naturellement présente dans le sol (Fassbinder et *al.*, 1990 ; Fassbinder et Stanjek, 1993). Pour les fossés néolithiques des enceintes néolithiques servent de « décharge » et l'apport des cendres de feu et des matériaux argileux cuits (tessons) dans ces structures sont responsables du contraste d'aimantation fort entre le fossé et son encaissant (sol et substrat ; Ard et *al.*, 2015).

2.3 THÉORIE DU POTENTIEL MAGNÉTIQUE ET SES APPLICATIONS

Cette partie est une courte synthèse non-exhaustive sur le potentiel magnétique et ses applications sur les données magnétiques. Cette synthèse a été réalisée à partir de l'ouvrage de référence sur la théorie du potentiel de Blakely (1995), des ouvrages de Parasnis (1984) et Telford et *al.* (2004) et de la thèse de Gavazzi (2015).

2.3.1 Le potentiel magnétique

Tout comme la gravimétrie, la méthode magnétique est une méthode géophysique dite de potentiel. Comme énoncé précédemment, le champ magnétique (\vec{H}) engendre une densité de flux magnétique (\vec{B}), aussi nommée induction magnétique, dans un matériau de perméabilité magnétique (μ) selon la relation Eq. 2.1. À l'échelle macroscopique, le champ magnétique est assimilable à l'induction magnétique. En prenant l'image d'un aimant et de ces lignes de champ qui se dessinent à l'extérieur de ce dernier, une des propriétés fondamentales du magnétisme est la conservation du flux magnétique (le flux entrant est égal au flux sortant). Ceci se traduit l'équation de Maxwell décrivant une divergence nul du champ magnétique :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

Eq. 2.5

La conservation du flux magnétique implique que le champ dérive d'un potentiel Φ . Ce dernier correspond à l'opposé du gradient d'un champ scalaire. Il est qualifié de potentiel scalaire en faisant

l'approximation que les courants électriques dans le milieu sont négligeables. Cette approximation est suffisante pour décrire le potentiel à l'extérieur des matériaux magnétiques. Le champ magnétique est défini par l'opposé du gradient du potentiel par la relation :

$$\vec{B} = -\vec{\nabla}\Phi = -\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}, \frac{\partial\Phi}{\partial y}, \frac{\partial\Phi}{\partial z}\right)$$

Eq. 2.6

Pour un dipôle magnétique, le potentiel Φ s'obtient comme la somme de deux monopôles de signes opposés de moment magnétique \vec{m} . Le potentiel magnétique a une distance r de la source (dipôle) est donné par la relation :

$$\Phi(r) = C_m \frac{\vec{m}\vec{r}}{r^3}$$

Eq. 2.7

Dans cette équation, \vec{r} est le vecteur distance et C_m , la constante d'ajustement suivant le système d'unité considéré ($C_m = 1$ dans le système C.G.S. et $C_m = \mu_0/4\pi = 10^{-7}$ dans le système international). La combinaison des équations Eq. 2.5 et 2.6 permet de déterminer la divergence du gradient, c'est à dire le laplacien du potentiel ($\nabla^2\Phi$). Le laplacien est nul indiquant que la modélisation d'un champ magnétique en 3D est possible via des mesures effectuées en 2D.

2.3.2 Applications de la théorie du potentiel à la prospection magnétique

La théorie du potentiel permet de modéliser et d'interpréter les anomalies magnétiques issues de sources diverses. En prospection magnétique, la mesure repose sur la déformation du champ magnétique terrestre (anomalie) par la présence de contrastes d'aimantation sous la surface du sol. Cette déformation se traduit par des variations de l'intensité du champ magnétique qui sont mesurables selon différents protocoles. La cartographie magnétique du sol est une représentation en 2D horizontale de la variation de l'intensité du champ magnétique total (ou des anomalies magnétiques). L'application de la théorie du potentiel aux anomalies magnétiques offre différentes méthodes d'interprétation pour comprendre et approcher les sources à l'origine de ces anomalies. Les méthodes d'interprétation se classent comme suit :

- La résolution du problème direct : cette méthode consiste à établir un modèle des sources à l'origine des anomalies magnétiques. Les paramètres de la source (géométrie, profondeur sous la surface, susceptibilité...) sont déterminés de manières empiriques pour calculer un modèle de l'anomalie magnétique. L'anomalie modélisée est comparée à l'anomalie observée. Les paramètres sont

modifiés jusqu'à la convergence entre l'anomalie calculée et observée. Cependant, le modèle est soumis à la non-unicité de la solution ;

- La résolution du problème inverse : cette méthode consiste à déterminer les paramètres de la source à partir de l'anomalie magnétique observée de la source. Le modèle de la source est aussi soumis à la non-unicité de la solution ;
- Les transformations : ces traitements consistent à modifier le signal observé sur les cartes magnétiques à l'aide, dans ces travaux, d'opérateurs dans le domaine spectral (transformée de Fourier). Ces transformations consistent à extraire (ou atténuer) une partie du signal magnétique.

2.3.3 Opérateurs de transformation de la carte magnétique

Les opérateurs de transformations des données de champ potentiel peuvent s'effectuer dans le domaine fréquentiel avec l'utilisation de la transformée de Fourier. Pour les données magnétiques, cette dernière est utilisée pour effectuer le prolongement, la réduction aux pôles et les dérivées directionnelles. Dans ces travaux, deux opérateurs de transformation ont été utilisés : le prolongement et la réduction aux pôles.

La carte magnétique est une représentation spatiale de l'intensité des anomalies magnétiques mesurée à une hauteur donnée (h_0). Le prolongement permet de calculer cette intensité à une hauteur différente (Henderson et Zietz, 1949). Le prolongement vers le haut (*upward continuation*) calcule l'intensité des anomalies à une hauteur supérieure ($h > h_0$) et inversement pour le prolongement vers le bas ($h < h_0$). Le prolongement vers le haut atténue les hautes fréquences du signal magnétique et a pour effet de lisser la carte magnétique. A l'inverse, le prolongement vers le bas (*downward continuation*) accentue les hautes fréquences et à diminuer le ratio signal/bruit de la carte magnétique.

La réduction aux pôles consiste à transformer les anomalies magnétiques mesurées à une latitude donnée, soit à une inclinaison et une déclinaison du champ magnétique terrestre particulière, en des anomalies mesurées aux pôles, soit dans un champ terrestre complètement vertical (Baranov et Naudy, 1964). Ce traitement des données magnétique permet de centrer les anomalies par rapport à leurs sources et de simplifier l'interprétation de la carte magnétique. La réduction aux pôles fonctionne bien sur les anomalies magnétiques dérivées d'une aimantation induite ou thermorémanente récente. Cependant, la réduction fonctionne mal pour les anomalies magnétiques issues d'une aimantation rémanente (sauf si l'aimantation est colinéaire avec le champ terrestre). Ces dernières ne sont pas centrées sur leurs sources.

2.4 MATÉRIELS ET PROTOCOLES UTILISÉS

La mesure du champ magnétique est une méthode n'utilisant pas de source artificielle (champ électromagnétique ou électrique) interagissant avec les matériaux du sous-sol : c'est une méthode

passive contrairement à la mesure de la susceptibilité magnétique qui nécessite un champ magnétique artificiel comme source d'interaction avec le matériau.

2.4.1 Protocole standard

Les protocoles standards, nommés ainsi dans ces travaux, font références aux protocoles de prospection magnétique n'utilisant pas d'instrument de positionnement externe au magnétomètre, comme un GPS ou un théodolite. Les premières utilisations en prospection géophysique appliquée à l'archéologie du GPS et du théodolite pour le positionnement des mesures peuvent être illustrées par les articles de Lehmann et Green (1999) et Leckebusch (2005).

Lors d'une prospection magnétique avec un protocole standard, le positionnement des mesures magnétiques est calculé en fonction du temps et de la longueur d'un profil. La position d'une mesure repose sur le postulat d'une vitesse de marche constante sur un profil. La rugosité du terrain et la topographie rendent difficiles le respect de ce postulat impliquant des décalages entre les profils : effet de « zigzag » appelé aussi « chevronnage ».

Les données magnétiques sont traitées par un programme informatique réalisé sous MatLab (*MathWorks*). Ce programme permet de corriger (Eder-Hinterleitner et *al.*, 1996) :

- Les valeurs aberrantes et les erreurs de mesure ;
- Les effets de linéation entre les profils ;
- Les effets de « zigzag » entre les passages liés au positionnement relatif des points de mesures magnétiques.

Les données magnétiques sont interpolées par la méthode du krigeage (Krige, 1951 ; Haas et Viailix, 1976 ; Hao et *al.*, 2012). La carte est ensuite géoréférencée à partir des positions prises au DGPS.

2.4.1.1 Gradiomètre à capteurs de type fluxgate

Le gradiomètre à capteurs de type *fluxgate* de type FEREX (*Foerster Instituut*) mesure le gradient de la composante verticale du champ magnétique total. Il est muni de quatre capteurs espacés les uns des autres de 0,5 m et montés sur un chariot (Figure 2.1). Les capteurs fournissent directement la mesure du gradient (en nT/m). Cet instrument possède une sensibilité de l'ordre de 0,3 nT (référence constructeur). Ce protocole permet une prospection rapide de quatre profils de mesure pour un passage. Le FEREX est programmé pour permettre une résolution spatiale de 20 mesures/m². Un carroyage est installé et les passages sont espacés de 2 m. Les angles du carroyage sont localisés par un DGPS (*Spectra Precision*).



Figure 2.1 : Gradiomètre FEREX (Foerster Institut) avec quatre capteurs de type fluxgate montés sur son chariot (©A. Camus).

2.4.1.2 Mesure du champ magnétique total

La configuration en pseudo-gradient consiste à placer deux capteurs l'un au-dessus de l'autre, connectés à un même magnétomètre. Les deux capteurs enregistrent le champ magnétique total, mais la contribution des anomalies locales au champ mesuré par le capteur du haut est plus faible que celle mesurée par le capteur bas.

Le retrait du signal enregistré par le capteur haut à celui du capteur bas permet de s'affranchir des variations diurnes du champ magnétique terrestre. Le signal ainsi extrait est à une approximation de l'intensité des anomalies magnétiques locales présentes dans le sol. Cependant, la dynamique du signal résultant en pseudo-gradient est plus faible que celle acquise avec un capteur mobile et une base (Mathé *et al.*, 2006).

La prospection magnétique avec la configuration en pseudo-gradient est réalisée avec un magnétomètre G-858 (*Geometrics*) composé de deux capteurs à vapeur de césium. Le magnétomètre enregistre des mesures avec une cadence de 10 Hz. Le capteur du bas est positionné à environ 0,3 m du sol et le capteur haut à 1,3 m. Un passage de l'opérateur correspond à un profil d'acquisition et chaque passage est espacé de 1 ou 0,5 m. À la fin de la prospection, le carroyage est relevé au DGPS (*Differential Global Positioning System ; Spectra Precision*).

2.4.2 Protocole par positionnement DGPS

Le magnétomètre GSMP-35G (*GEM System*) est composé de deux capteurs à vapeur de potassium. Les capteurs peuvent être arrangés en pseudo-gradient ou espacé horizontalement suivant le contexte de prospection (disponibilité ou non d'une base). Le magnétomètre a une sensibilité de $0,3 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ (référence constructeur) et enregistre avec une cadence de 20 Hz.

Ce magnétomètre est équipé d'une antenne GPS. Le positionnement par GPS permet un enregistrement toute les secondes de la position des mesures magnétiques. Avec ce protocole, l'installation d'un carroyage n'est pas nécessaire et permet de prospecter dans des zones difficiles d'accès (contournement facile des obstacles : arbres, arbustes, rochers...). Afin de couvrir uniformément la zone à prospecter, un carroyage, ou tout du moins des repères spatiaux, est tout de même installé.

2.4.3 Protocole à haute résolution et haute précision de positionnement

Le protocole de prospection magnétique à haute résolution spatiale et haute précision utilise deux instruments employés indépendamment l'un de l'autre. La mesure du champ magnétique total est effectuée par un magnétomètre G-858 (*Geometrics*) composé de deux capteurs à vapeur de césium espacés horizontalement l'un de l'autre de 0,39 m (Figure 2.2a). La sensibilité de ces capteurs est de l'ordre de 0,1 nT (Mathé et *al.*, 2006). Les valeurs du champ magnétique total sont corrigées de la variation diurne du champ terrestre (liée à l'activité solaire) en employant un deuxième magnétomètre G-858 disposé en base (Figure 2.2b) et éloigné de toutes pollution magnétique (infrastructures électriques à 50 Hz, route, habitation...). Les deux magnétomètres enregistrent 10 mesures par seconde. Pour la mesure du champ total, le magnétomètre GSMP-35G (*GEM System*) peut être aussi utilisé avec la même configuration des capteurs.

Un réflecteur est placé entre les deux capteurs (Figure 2.2a). Il réfléchit un faisceau laser transmis par la station totale S8 (*Trimble* ; Figure 2.2c). Ceci permet de localiser la position du réflecteur avec une précision millimétrique (Trimble, 2015). La station totale enregistre un maximum de 20 mesures par seconde.

Le magnétomètre enregistre uniquement le champ magnétique total en fonction du temps mais sans information sur la position de la mesure. La position des mesures magnétiques est indirectement fournie par la localisation du réflecteur par la station totale (Lévêque et Mathé, 2015). Pour la prospection mise en œuvre au Pontet (voir partie suivante), les profils de mesures magnétiques correspondent aux rangs de maïs semés 4 à 6 semaines avant les investigations (Figure 2.2a). L'opérateur suit ces rangs et couvre uniformément l'espace sans avoir à positionner de carroyage. L'espacement entre les deux capteurs du magnétomètre correspond à la moitié de la largeur entre deux rangs (espacées de 0,78 m).

La station totale motorisée et le magnétomètre G-858 fonctionnent indépendamment l'un de l'autre. Les mesures magnétiques et les positions sont sauvegardées sous deux fichiers informatiques différents avec pour variable commune le temps. Pour associer les deux ensembles de données, une phase de « synchronisation » s'effectue au début de la prospection. Le principe de la synchronisation est de corréler un signal magnétique avec un déplacement. Pour ce faire, un mouvement de balayage des

capteurs du magnétomètre s’effectue en direction d’une boussole. Ainsi, le magnétomètre enregistre la variation d’amplitude du signal magnétique (lié à l’éloignement et au rapprochement des capteurs de la boussole) et la station totale enregistre le déplacement associé à ce mouvement (Lévêque et Mathé, 2015).

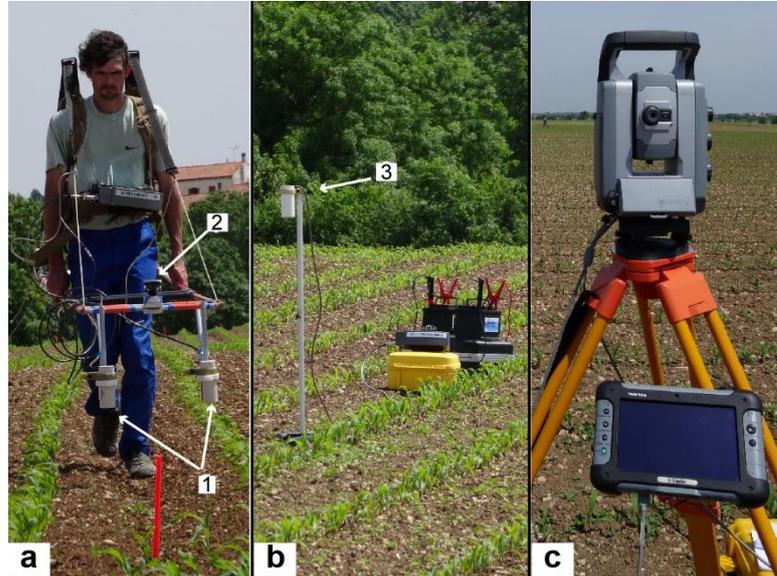


Figure 2.2 : (a) Magnétomètre G-858 (Geometrics) avec deux capteurs à vapeur de césium (1) espacés horizontalement de 0,39 m. Réflecteur à 360° placé entre les capteurs (2). (b) Magnétomètre G-858 disposé en base (3). (c) Station totale robotisée de type S8 (Trimble).

Les données sont traitées en utilisant une séquence programmée sous le logiciel MatLab (MathWorks) et interpolées par la méthode du krigeage (Krige, 1951 ; Haas et Viallix, 1976 ; Hao *et al.*, 2012). Le traitement des données s’effectue en trois phases principales :

- La correction ou la suppression de données aberrantes sur les fichiers des mesures magnétiques et de localisation ;
- La fusion : assemblage des mesures magnétiques avec les données de localisation ;
- L’interpolation spatiale des données pour obtenir une carte de la répartition spatiale des anomalies magnétiques ou une représentation en trois dimensions (sans interpolation) des données fusionnées.

Des positions de référence ont été localisées par la station totale et un DGPS (*Spectra Precision*) pour géoréférencer les données de magnétiques associées à une localisation. Finalement, l’erreur de localisation des mesures magnétiques est approximativement de quelques centimètres.

2.4.4 Mesure de la susceptibilité magnétique

Le susceptibilimètre KT9 (*Kappameter* ; Figure 2.3) utilise une bobine conductrice générant un champ magnétique variable avec une fréquence d’oscillation de 10 kHz pour mesurer la susceptibilité magnétique. La mesure de susceptibilité magnétique est dite volumique car elle intègre un volume de

sol d'une dizaine de cm^3 (Lecoanet et *al.*, 1999). La mesure est sensible à la rugosité de la surface du sol. Pour obtenir une valeur représentative, cinq mesures sont effectuées et espacées les unes des autres d'une dizaine de centimètres pour valider la reproductibilité des mesures. La valeur médiane de ces cinq mesures correspond à la susceptibilité magnétique de la partie superficielle du sol. La position de chaque ensemble de cinq mesures est relevée au DGPS (*Spectra Precision*).



Figure 2.3 : Susceptibilimètre KT-9 (*Kappameter*) et le GPS différentiel (*Spectra Precision*).

3 LA PROSPECTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE PAR MÉTHODE *SLINGRAM*

Cette synthèse bibliographique sur la prospection électromagnétique par méthode *Slingram* est basée sur les ouvrages de référence de Reynolds (1997) et Telford et *al.* (2004), les cours de géophysique appliquée de Chouteau et Giroux (2008) et les notes techniques de McNeill (1980a, 1980b). Le détail du formalisme mathématique de la méthode électromagnétique est présenté de manière précise et complète dans les ouvrages de Scollar et *al.* (1990) et de Telford et *al.* (2004) et le détail de l'approximation du faible nombre d'induction dans la note technique de McNeill (1980b).

La prospection électromagnétique par méthode *Slingram* mesure la conductivité électrique apparente de la subsurface. Les propriétés électriques du sol et des structures archéologiques ont déjà été abordées dans la partie précédente sur la prospection électrique. Les conductivimètres de type *Slingram* sont composés d'une bobine émettrice (émission d'un champ magnétique primaire) et au moins d'une bobine réceptrice (capte un champ magnétique résultant : combinaison des champs primaire et secondaire). Ces conductivimètres utilisent comme source d'interaction avec les matériaux conducteurs du sol, un dipôle magnétique variable dans le temps (champ primaire), généré par un courant électrique alternatif dans une bobine conductrice. Le principe de base est l'induction

électromagnétique décrite par la loi de Faraday : le champ magnétique primaire interagit avec les conducteurs en générant en leur sein des déplacements de charges électriques, appelés courants de Foucault. Ces courants induisent à leur tour un champ magnétique secondaire capté par la bobine réceptrice. La particularité de ces appareils est que les basses fréquences utilisées et l'écartement entre les bobines respectent la condition du faible nombre d'induction (LIN : Low Induction Number). Dans ces conditions, le champ magnétique secondaire possède une composante en quadrature et une composante en phase avec le champ primaire. La première est proportionnelle à la conductivité électrique et la seconde porte une information influencée en partie par la susceptibilité magnétique du sol.

3.1 PRINCIPES GÉNÉRAUX

Selon la loi d'Ampère, la circulation d'un courant électrique dans une bobine ou une boucle conductrice génère un dipôle magnétique. Au centre de la boucle, le dipôle magnétique dépend du rayon et de l'intensité du courant électrique selon la loi de Biot-Savart. Dans la bobine émettrice des appareils de prospection électromagnétique, le courant électrique est alternatif induisant un champ magnétique variable dans le temps qui est qualifié de champ primaire (H_s ; Figure 3.1).

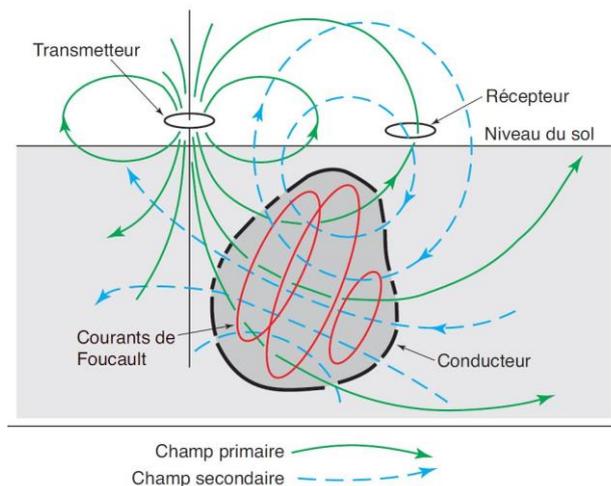


Figure 3.1 : Représentation schématique du principe de la prospection électromagnétique (Chouteau et Giroux, 2008). Le transmetteur génère un champ magnétique qui interagit avec les conducteurs de la subsurface. Le champ primaire induit des courants de Foucault dans ces conducteurs générant un champ magnétique secondaire. Les champs primaire et secondaire sont captés par le récepteur et porte une information sur la conductivité des matériaux traversés par l'onde électromagnétique.

La présence de matériaux conducteurs dans le sol implique une interaction avec le champ primaire : c'est l'induction électromagnétique. Il génère des déplacements de charges électriques dans ces matériaux induisant des courants de Foucault. Selon la loi de Lenz, ces courants circulent dans le sens inverse du champ magnétique inducteur. D'après la loi de Faraday sur l'induction électromagnétique, l'amplitude du courant électrique dans le matériau est directement proportionnelle aux oscillations du champ magnétique appliqué. L'amplitude est nulle quand l'amplitude du champ magnétique est à un maximum ou un minimum (déphasage de $\pi/2$; Figure 3.2b). Les courants de

Foucault dans le matériau ne sont présents que durant un temps fini (amplitude du champ électrique nul aux amplitudes maximales et minimales du champ primaire). Ils possèdent ainsi un déphasage α par rapport au champ électrique secondaire appliqué (Figure 3.2c). Ce déphasage dépend des propriétés électriques du matériau : pour des conducteurs, α est important et inversement pour des résistants. Ainsi, les courants de Foucault sont responsables de la circulation d'un courant électrique dans les matériaux du sol générant un champ magnétique, dit secondaire (H_S), et opposé au champ primaire. Le champ primaire et le champ secondaire interagissent pour donner un champ magnétique résultant (H_R). Ce dernier est capté par la bobine réceptrice du conductivimètres avec un déphasage ϕ par rapport au champ primaire (Figure 3.2d).

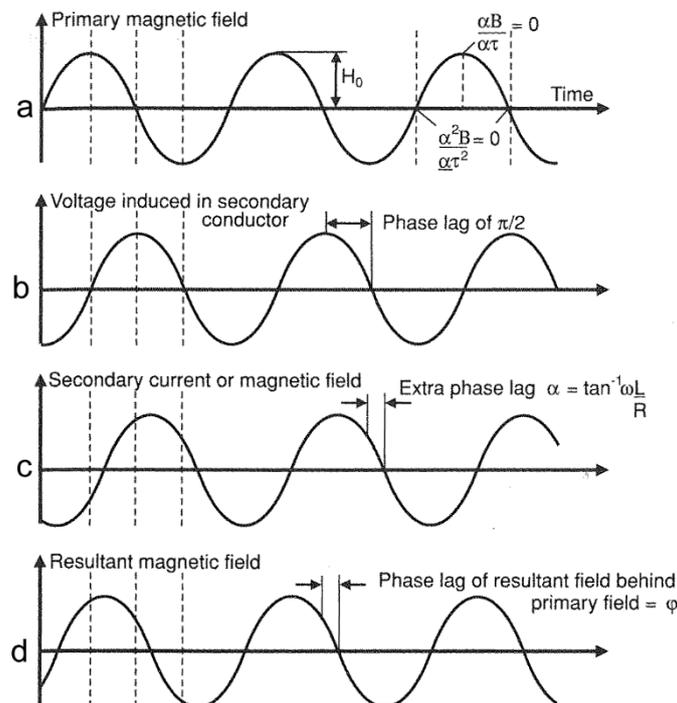


Figure 3.2 : Relation entre le champ magnétique primaire (a), le champ électrique secondaire (induced voltage) (b), le courant électrique secondaire (champ secondaire) (c) et le champ magnétique résultant (d) (Reynolds, 1997).

Les relations vectorielles entre le champ primaire H_P , secondaire H_S et résultant H_R montrent une composante réelle, dite en phase, et une composante imaginaire, dite en quadrature. Le signal en quadrature porte l'information sur la conductivité électrique des matériaux du sol. Le signal en phase dépend entre-autre de la susceptibilité magnétique du volume de sol traversé par l'onde électromagnétique. Généralement, les appareils de type *Slingram* mesurent les deux composantes du signal.

3.2 PROFONDEUR DE PEAU, APPROXIMATION DU FAIBLE NOMBRE D'INDUCTION ET SENSIBILITÉ

L'onde électromagnétique émise depuis une source ne pénètre pas indéfiniment dans le sol. La présence de matériaux conducteurs dans le milieu traversé diminue sa pénétration : elle est atténuée

exponentiellement avec la profondeur (principe d'atténuation). Sa pénétration dépend principalement de la fréquence et de la conductivité électrique du terrain prospectée.

La profondeur de peau (*skin depth*) est un paramètre qui détermine cette profondeur de pénétration. Elle est définie comme la profondeur où l'amplitude de l'onde électromagnétique a diminué de 37 % par rapport à l'amplitude initiale. L'approximation de la profondeur de peau δ est définie par :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\sigma}} = \frac{\sqrt{2i}}{\gamma} \quad \text{avec} \quad \gamma = \sqrt{i\omega\mu_0\sigma} \quad \text{et} \quad i = \sqrt{-1}$$

Eq. 3.1

Pour les conductivimètres de type *Slingram*, la profondeur de pénétration dépend aussi de l'écartement entre la bobine émettrice et la bobine réceptrice, noté s :

$$\gamma_s = \sqrt{2i} \frac{s}{\delta} = \sqrt{2i} B$$

Eq. 3.2

Le ratio s/δ entre l'écartement inter-bobines et la profondeur de peau est défini comme le nombre d'induction, noté B . La composante en quadrature du champ secondaire est directement proportionnelle à la conductivité électrique des matériaux traversés, si et seulement si, le nombre d'induction est faible, c'est-à-dire très inférieur à 1 ($B \ll 1$ ou $\gamma_s \ll 1$). L'approximation du faible nombre d'induction (LIN : *Low Induction Number*) permet de mettre en relation le ratio entre le champ secondaire et le champ primaire avec la conductivité électrique d'un demi-espace homogène et isotrope :

$$\frac{H_s}{H_p} \simeq \frac{iB^2}{2} = \frac{i\omega\mu_0\sigma s^2}{4}$$

Eq. 3.3

Comme le sol est un milieu hétérogène, le champ résultant capté par la bobine réceptrice dépend d'une interaction complexe avec les différents conducteurs composant la subsurface. De ce fait, la conductivité électrique est qualifiée d'apparente (σ_a), comme pour les méthodes électriques. Ainsi, la conductivité apparente du terrain est proportionnelle au ratio entre le champ secondaire et primaire pour la composante en quadrature selon :

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega\mu_0 S^2} \left(\frac{H_S}{H_P} \right)_{quadrature}$$

Eq. 3.4

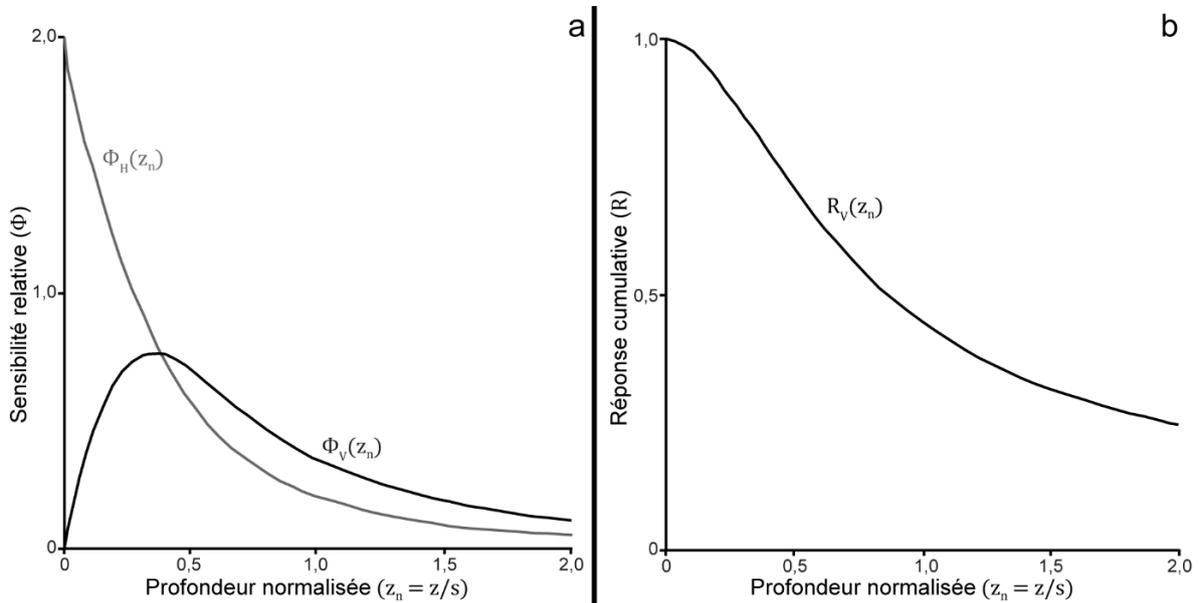


Figure 3.3 : (a) Fonction de sensibilité relative pour une fine couche homogène pour des bobines orientées horizontalement (Φ_V) et verticalement (Φ_H). (b) Réponse cumulative pour le VMD (R_V) du champ magnétique secondaire en fonction de la profondeur normalisée (McNeill, 1980b).

L'orientation des bobines par rapport au sol a une influence sur la mesure de la conductivité apparente. Les bobines orientées horizontalement possèdent un dipôle magnétique vertical ; cette orientation est qualifiée de VMD (vertical magnetic dipole). Pour les bobines orientées verticalement, le dipôle magnétique est horizontal (HMD : horizontal magnetic dipole). Pour un demi-espace homogène et isotrope, la contribution relative d'une fine couche homogène à une profondeur normalisée z_n (profondeur « z » divisée par l'écartement inter-bobines « s ») sur le champ secondaire n'est pas constante. Cette contribution est décrite par la fonction de sensibilité relative (Φ) ou de réponse impulsionnelle. Cette fonction n'a pas les mêmes caractéristiques selon l'orientation du dipôle magnétique (ou des bobines ; Figure 3.3a). Pour le VMD ($\Phi_V(z_n)$), la contribution relative de la proche surface est très faible et elle atteint un maximum pour une profondeur normalisée de 0,4 m. La fonction de sensibilité décroît rapidement en deçà du maximum. Pour le HMD ($\Phi_H(z_n)$), la fonction de sensibilité est élevée près de la surface et décroît rapidement avec la profondeur normalisée. Cette dernière configuration est adaptée pour la détection d'objet très proche de la surface. L'intégrale de la fonction de sensibilité relative donne la fonction de réponse cumulative (R ; Figure 3.3b). Cette dernière décrit la contribution totale de toutes les fines couches composant le demi-espace homogène sur la mesure de la conductivité apparente en fonction de la profondeur normalisée. Cette fonction R_V , en VMD, montre que la contribution d'une couche ou d'un objet situé à une profondeur normalisée de 1,5 m possède une influence encore significative sur la conductivité apparente mesurée. Globalement, pour un milieu

homogène et isotrope, et en respectant l'approximation du LIN, la profondeur effective d'investigation des conductivimètres de type *Slingram*, orientés en VMD, est de 1,5 fois l'écartement inter-bobines.

3.3 CONDUCTIVIMÈTRES UTILISÉS ET PROTOCOLE

Deux conductivimètres ont été employés dans cette étude : l'EM38-MK2 et l'EM31-MK2 (*Geonics Ltd*). Le premier fonctionne à une fréquence de 14,5 kHz. Il est composé d'une bobine émettrice et de deux bobines réceptrices. L'espacement des récepteurs avec l'émetteur est de 0,5 m et de 1 m. En VMD, l'appareil fournit donc deux mesures de conductivité électrique apparente selon deux profondeurs d'investigation effectives : 0,75 m pour l'écartement de 0,5 m et 1,5 m pour l'écartement de 1 m.

L'EM31-MK2 a une fréquence de 9,8 kHz et possède deux bobines émettrice et réceptrice, espacées de 3,66 m l'une de l'autre. Son volume d'investigation est une demi-sphère d'un rayon d'environ 6 m. On considère que la mesure intègre une profondeur comprise entre 1,5 et 5 m sous l'instrument.

La cartographie de la conductivité apparente de la subsurface est effectuée par un opérateur parcourant des profils espacés d'une certaine distance, fonction de l'appareil utilisé. La méthode ne nécessite pas de contact avec le sol, rendant la prospection plus aisée que la méthode électrique. L'EM38-MK2 est employé pour détecter des structures proches de la surface et de dimension minimale de l'ordre de 0,5 à 1 m. Les profils sont donc espacés de 1 à 2 m. Pour l'EM31-MK2, compte-tenu de son imposant volume d'investigation (plusieurs centaines de mètres cubes), les profils sont espacés de 5 à 8 m. Les deux instruments sont portés par l'opérateur : 0,3 m au-dessus du sol pour l'EM38 et environ 1 m pour l'EM31. Ils sont déplacés à une vitesse de marche supposée constante (entre 1 et 1,5 m/s suivant l'opérateur). Les mesures de conductivité apparente sont enregistrées à intervalle régulier toutes les secondes. À chaque mesure est attribuée une position mesurée par un DGPS (*Spectra Precision*) qui est synchronisé avec le conductivimètre. Ce protocole ne nécessite pas l'implantation de carroyage.

Les résultats de la prospection sont représentés sous la forme d'une carte d'isovaleurs décrivant la répartition spatiale de la conductivité électrique apparente de la subsurface. L'interpolation spatiale des points de mesures est effectuée par la méthode *Inverse distance to power*. Le maillage de la carte de conductivité apparente est de 1x1 m pour l'EM38 et de 2x2 m pour l'EM31.

3.4 INFLUENCE ET ERREUR SUR LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE APPARENTE MESURÉE

Plusieurs paramètres et erreurs, dont les origines sont intrinsèques à l'appareil, liées à la théorie de la méthode ou associées à la nature lithologique du milieu prospecté, influencent la conductivité

électrique apparente mesurée par l'EM31-MK2, l'EM38-MK2 et des autres conductivimètres de type *Slingram*.

3.4.1 Erreur intrinsèque au conductivimètre et au protocole

Les appareils électromagnétiques nécessitent un réglage (mise à zéro) en début de prospection. L'absence de réglage entraînera des mesures de conductivités apparentes ne correspondant pas à la réalité du terrain. Malgré tout, ces appareils possèdent une dérive thermique (liée à la température ambiante) entraînant un décalage progressif de la conductivité apparente mesurée par rapport à celle du terrain (McNeill, 1980b). La dérive thermique est progressive et non-linéaire avec la variation de la température ambiante au cours d'une journée de prospection. Elle est non-négligeable pour de fortes amplitudes thermiques entre le début et la fin de la prospection : écart d'environ 10 mS/m pour une variation de température de 23 à 35 °C sur huit heures (valable uniquement pour l'EM38-MK1). La correction de cette dérive est effectuée par des réglages réguliers de l'appareil à une même position (Sudduth et *al.*, 2001). Pour des raisons pratiques, cette démarche n'a été pas effectuée dans ces travaux car les résultats des cartes ne montraient pas de dérive temporelle de la conductivité apparente au cours de la journée. Les prospections ont été réalisées durant des périodes estivales avec une amplitude modérée des températures au cours d'une journée, rendant ce phénomène de dérive thermique négligeable.

Le positionnement continu des mesures de conductivité apparente par un DGPS permet une collecte de données beaucoup plus importante et plus rapidement qu'autrefois (Cannon et *al.*, 1994), où les mesures se faisaient selon un carroyage (Scollar et *al.*, 1990) voir par un positionnement relatif via des capteurs à ultrason (Nyquist et Blair, 1991). Néanmoins, le DGPS utilisé dans ces travaux possède une erreur de positionnement relative d'environ 0,5 m en enregistrement continu. Cette erreur est acceptable compte-tenu du volume d'intégration de l'EM38 et de EM31.

3.4.2 Influence des milieux hyper-conducteurs

La profondeur de peau et le nombre d'induction dépendent de la conductivité électrique du milieu traversé par l'onde électromagnétique (Eq. 3.1 et Eq. 3.2). De ce fait, la condition du LIN dépend de la conductivité du terrain prospectée. McNeill (1980b) considère que, pour un demi-espace homogène et isotrope, l'approximation du LIN est valide pour des conductivités inférieures à 100 mS/m (Figure 3.4). Cela signifie que la conductivité apparente mesurée par le conductivimètre est linéairement proportionnelle à la conductivité du demi-espace si elle est inférieure à 100 mS/m. Dans la grande majorité des terrains, cela ne pose pas de problème. Il est à noter que la valeur fixée de cette rupture dépend aussi de la fréquence et de l'écartement inter-bobines, donc du conductivimètre employé (McNeill, 1980b ; Beamish, 2011).

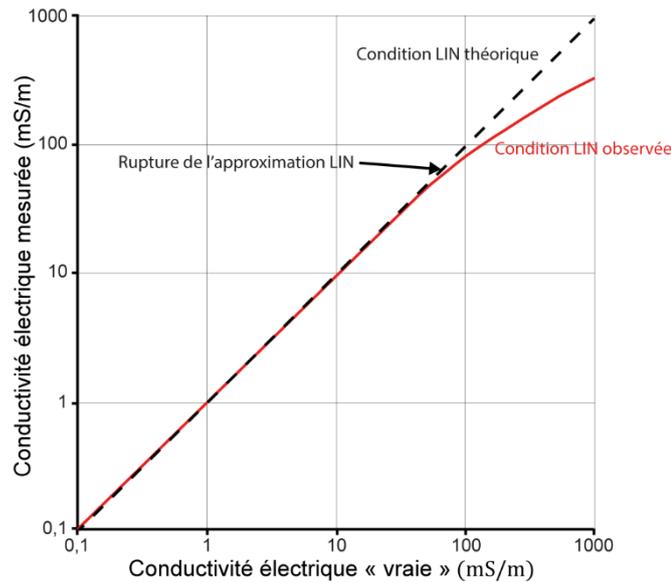


Figure 3.4 : Approximation du LIN de l'EM31-MK2 orienté en VMD (ligne rouge) avec la relation linéaire de la condition LIN théorique (pointillés noirs) : relation entre conductivité électrique (« vraie ») d'un demi-espace avec la conductivité mesurée en VMD par le conductivimètre (d'après (McNeill, 1980b)).

En revanche, pour des milieux hyper-conducteurs où la salinité de l'eau interstitielle est élevée, comme les formations littorales (Delefortrie et al., 2014 ; Mathé et al., 2016) ou sur des sols salés (Wollenhaupt et al., 1986 ; Johnston et al., 1997 ; Kinal et al., 2006), la conductivité du terrain dépasse largement 100 mS/m. Dans ces conditions, la rupture de l'approximation du LIN implique des conductivités apparentes sous-estimées et sa relation avec la conductivité du terrain n'est plus linéaire (Beamish, 2011 ; Delefortrie et al., 2014). Pour l'EM31-MK2, une valeur de conductivité apparente mesurée à 200 mS/m correspond à une conductivité « vraie » du terrain de 350 mS/m (Mathé et al., 2016). La conséquence est une distorsion de la répartition spatiale et une faible dynamique des contrastes de la conductivité apparente de la subsurface qui sont d'autant plus importantes que la salinité du sol est élevée (Beamish, 2011). Pour corriger cette distorsion, Beamish (2011) propose un « facteur de correction d'équivalence LIN » (*LIN-equivalent correction factor*) consistant à corriger la dérive théorique du LIN pour retrouver une relation linéaire entre conductivité mesurée et conductivité « vraie ». Ce facteur de correction est une polynomiale d'ordre 3 dont les coefficients sont spécifiques au conductivimètre utilisé, à l'écartement inter-bobines, à l'orientation du dipôle magnétique et à la distance entre le sol et les bobines.

Cependant, sur la zone intertidale de la plaine maritime flamande en Belgique (où la conductivité apparente mesurée dépasse 500 mS/m), Delefortrie et al. (2014) montre que cette correction génère des biais dans la carte corrigée de la conductivité apparente. De plus, même si les conductivités apparentes sont complètement sous-estimées, l'interprétation qualitative des contrastes n'en est pas affectée pour autant.

Néanmoins, l'interprétation qualitative dans des conditions de salinité élevée du sédiment (sans correction de la dérive du LIN) dépend aussi des conditions environnementales. Dans le cas de l'étude

archéologique et paléogéographique des ports antiques de Narbonne, la dynamique des contrastes de conductivité apparente (mesurées à l'EM31-MK2) était trop faible pour être interprétable. Mathé et *al.* (2016) propose le retrait de la médiane, selon une fenêtre glissante, pour augmenter les contrastes de la carte conductivité apparente (appelée cartes des anomalies de conductivité apparente).

Les terrains présentant de fortes conductivités électriques ont aussi une influence sur la profondeur d'investigation des appareils : elle décroît quand la conductivité augmente. Cette décroissance est d'autant plus importante que l'écartement inter-bobines est grand (Beamish, 2011). De ce fait, en milieu hyper-conducteur, l'EM31-MK2 possède une profondeur d'investigation beaucoup plus affectée par ce phénomène que l'EM38-MK2 (Mathé et *al.*, 2016). Selon des simulations sur des modèles à deux couches, Callegary et *al.* (2007) détermine une diminution de 50 % de la profondeur d'investigation effective. Néanmoins, cette diminution semble être surestimée par rapport aux observations *in-situ* où la perte de profondeur d'investigation est plutôt de l'ordre de 25 % (Delefortrie et *al.*, 2014).

Malgré les difficultés rencontrées dans ces milieux hyper-salins, le rapport signal/bruit pour des prospections effectuées dans des conditions hors de l'approximation du LIN restent bonnes (Delefortrie et *al.*, 2014). Ceci a été testé pour le conductivimètre DualEM (*DUALEM Inc.*) mais il est fort probable que ce constat soit aussi valable pour l'EM31-MK2 et l'EM38-MK2.

4 ESSAI PÉNÉTROMÉTRIQUE

Les essais pénétrométriques sont réalisés à l'aide d'un pénétromètre dynamique léger à énergie variable de type PANDA[®] 2 (*Sol Solution*) : Pénétromètre Autonome Numérique Dynamique Assisté par ordinateur (Figure 4.1). C'est un outil issu de la géotechnique employé pour la reconnaissance des sols et le contrôle du compactage. Le principe consiste à enfoncer à coups de maillet une tige en acier terminée par une pointe (dont le diamètre est supérieur à la tige pour limiter les frottements latéraux). Ainsi, l'opérateur martèle une tête de frappe (enclume) posée au-dessus de la tige et reliée à un dispositif d'acquisition de données. À chaque battage, la tête de frappe mesure la quantité d'énergie envoyée dans le train de tige et la pointe. Une courroie crantée, reliant la tête de frappe au dispositif d'acquisition, permet de mesurer l'enfoncement de la tige dans le sol. La mesure de l'énergie et de l'enfoncement permet de calculer, par le biais d'une formule mathématique dite des « Hollandais », la résistance de pointe :

$$Qd = \frac{E}{Se} \cdot \frac{m}{(m + p)}$$

Eq. 4.1

Qd : résistance de pointe (MPa : mégapascal)
E : quantité d'énergie lors du battage ($\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)
S : section basale de la pointe (m^2)

e : enfoncement de la pointe (m)
m : masse du maillet (kg)
p : masse de l'ensemble frappé (kg)

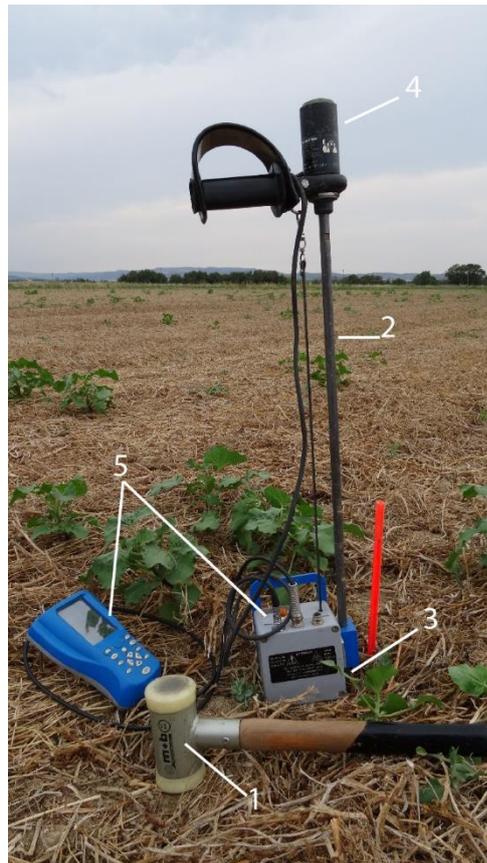


Figure 4.1 : Pénétrömètre dynamique de type PANDA® 2. Le principe consiste à enfoncer à coups de maillet (1) une tige en acier (2) munie à l'extrémité d'une pointe (3). L'opérateur frappe sur une enclume munie d'un capteur de pression (4) reliée à un dispositif d'acquisition de données (5).

La représentation de *Qd* avec la profondeur permet d'obtenir un profil de la résistance de pointe, appelé pénétrogramme. Ce dernier met en évidence les contrastes mécaniques du milieu prospecté (Martinaud et al., 1999 ; Maquaire et al., 2002). La résistance de pointe est un paramètre principalement sensible à la granulométrie et à la teneur en eau du sédiment (Bernard et Dudoignon, 2007). Ainsi, le pénétrogramme met en évidence les variations mécaniques du terrain comme sa dureté et sa compaction. Pour ces raisons et sa facilité d'utilisation, le pénétromètre PANDA® 2 a été détourné de son usage traditionnel pour être appliqué à l'archéologie (Breysse et al., 2002 ; Galinié et al., 2003 ; Lenoble et Martinaud, 2003), aux sciences du sol (Bernard-Ubertosi et al., 2009) et à la géomorphologie (Martinaud et al., 1999 ; Maquaire et al., 2002 ; Cosenza et al., 2006). Il peut être considéré comme une méthode d'investigation très complémentaire des sections de résistivité électrique et des carottes sédimentaires (Martinaud et al., 1999 ; Cosenza et al., 2006).

L'erreur moyenne du PANDA[®] 2, calculée à partir d'essais pénétrométriques réalisés par un même opérateur, en laboratoire et *in-situ*, est de 5 %. Le PANDA[®] 2 possède une très bonne répétabilité des mesures. Les frottements latéraux et l'effet de l'opérateur sur le pénétrogramme sont supposés négligeables (Benz-Navarrete, 2009). Néanmoins, l'effet opérateur est présent dans des sédiments très meubles (milieux argileux et saturés en eau) où la résistance de pointe est très faible ($Q_d < 2$ MPa ; Bernard et Dudoignon, 2007). Dans ces environnements, l'opérateur influence la résolution verticale du pénétrogramme : l'enfoncement de la pointe dépend directement de la force de frappe de l'opérateur. Ainsi, le nombre de points par mètre (vertical) peut varier de manière importante pour une même texture sédimentaire. De cette observation découle la notion de détectabilité du pénétromètre, soit de sa sensibilité verticale. À partir d'analyses variographiques de pénétrogrammes, Breysse et *al.* (2002) estiment que la mesure de la résistance de pointe est influencée par une zone d'environ 5 cm autour de la pointe. Même si cette valeur est à titre local (Denis et *al.*, 1997 ; Breysse et *al.*, 2002), elle peut être utilisée comme une valeur de référence de la sensibilité moyenne du PANDA[®] 2 : sa résolution verticale est centimétrique.

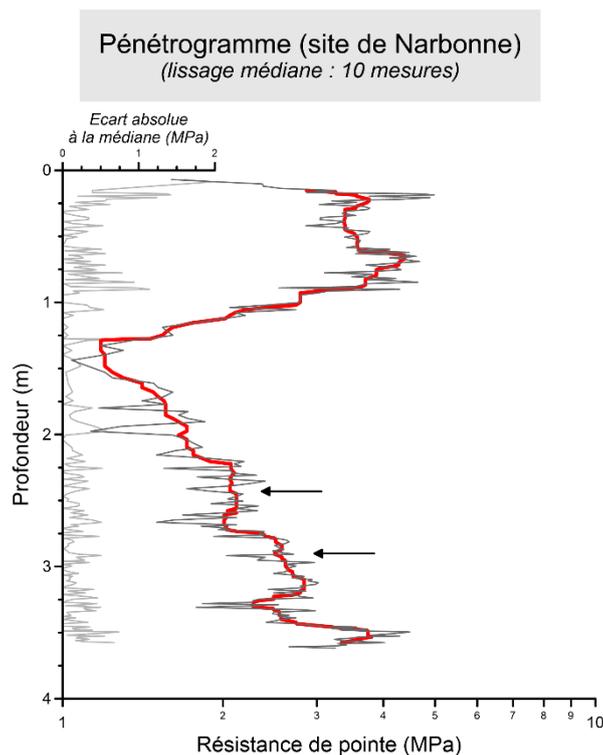


Figure 4.2 : Exemple de pénétrogramme. Le lissage à la médiane glissante (courbe rouge) retire le signal haute fréquence et les valeurs aberrantes du pénétrogramme brute (gris). Ce traitement permet de mieux décrypter l'information comme la présence de probables couches lithologiques (flèches noires).

Une autre source d'erreur est la présence ponctuelle de valeurs très élevées de résistance de pointe par rapport aux valeurs voisines. Ces erreurs peuvent être liées à des artefacts géologiques ou archéologiques (comme un petit bloc calcaire ou une céramique) voir un défaut de mesure lié à l'opérateur. Même si ces valeurs peuvent être un objet réel quelconque dans le sol, elles sont considérées comme aberrantes (Breysse et *al.*, 2002 ; Lenoble et Martinaud, 2003). Un lissage par une médiane

glissante est une manière rapide et efficace pour éliminer ces valeurs et rendre l'interprétation du pénétrogramme plus aisée (Figure 4.2). La médiane glissante élimine aussi le signal haute fréquence qui est important, surtout dans les couches sédimentaires avec une résistance de pointe élevée (niveaux sableux). L'analyse du refus est aussi une aide pour connaître la profondeur du substrat rocheux.

5 PHOTOGRAPHIE ET PHOTOGRAMMÉTRIE

Le survol par drone a été uniquement réalisé sur le site néolithique du Pontet. La gestion des préparatifs du vol et du drone a été réalisée par Nicolas Lachaussée. Le traitement des images par photogrammétrie pour acquérir une orthophotographie et un modèle numérique de surface a été effectué par Bastien Millescamps.

Cette partie sur la création de modèle numérique de surface (MNS) et d'orthophotographie réalisés par photogrammétrie à partir de clichés aériens acquis par drone est un bref aperçu de la méthode. Le principe de la photogrammétrie et les traitements de l'image associés seront présentés de manière non-exhaustive. Pour plus d'informations sur la photogrammétrie et le traitement de l'image, les lecteurs peuvent consulter les ouvrages de Scollar *et al.* (1990) et de Kraus et Waldhausl (1998).

5.1 PRINCIPE DE LA PHOTOGRAMMÉTRIE

La photogrammétrie est une technique qui permet de définir avec précision les formes, les dimensions et la position dans l'espace d'un objet à partir d'un recouvrement photographique sous différents angles d'observation. Le logiciel de photogrammétrie recherche les points communs (ensemble de pixels) entre différents couples d'image via un algorithme de corrélation. Un point commun est validé si son coefficient de corrélation est supérieur au seuil fixé (Kraus et Waldhausl, 1998). Le logiciel utilisé pour détecter les points de similitudes entre les photographies et générer une orthomosaiques et un modèle numérique de surface est le logiciel Photoscan (*Agisoft*).

5.2 MATÉRIELS ET PROTOCOLE

Le drone utilisé pour cette étude est une aile volante propulsée par une hélice : modèle eBee (*Sensefly* ; Figure 5.1). Ce drone est équipé d'un appareil photo CANON Powershot ELPH110 HS RGB de 16.1 Mégapixels optimisé et calibré pour la photogrammétrie. La planification du vol automatique et le suivi en temps réel de l'appareil est réalisé par le logiciel eMotion 2.

L'acquisition s'est déroulée le 21 septembre 2016 sur une parcelle agricole en bordure de la Charente (commune de Soubise). Les conditions météorologiques ont été optimales pour réaliser la mission par drone (ciel dégagé, peu de vent). Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques des vols réalisés durant la mission (fig. III.13b).

Vol	Hauteur de vol	Résolution	Recouvrement lat / long	Durée	Capteur	Zone couverte
1	130 m	4 cm/pixel	80% / 75%	24 min	RGB	Ensemble parcelle
2	58 m	1.8 cm/pixel	80% / 75%	21 min	RGB	Fouilles
3	114 m	2 cm/pixel	80% / 75%	24 min	NIR	Ensemble parcelle

Tableau 5.1 : Caractéristiques des vols du 21 septembre 2016.



Figure 5.1 : Drone eBee (Sensefly). Aile volante propulsée par une hélice (© B. Millescamps)

5.3 ORTHOPHOTOGRAPHIES ET MODÈLES NUMÉRIQUES DE SURFACE

L'imagerie par drone a été employée dans l'optique d'acquérir deux orthophotographies et deux MNS à différentes résolutions spatiales et précisions via deux vols à 58 et 130 m d'altitude. Sur la Figure 5.2 sont présentées les orthophotographies et les MNS des deux vols. Le survol de la zone à une altitude de 130 m permet d'obtenir, après traitement par photogrammétrie, une orthophotographie avec une résolution spatiale de 625 points/m², soit un pixel de 0.04 m (Figure 5.2a), pour une surface de 25 ha environ. Le MNS associé (Figure 5.2b) est dégradé à une résolution spatiale de 156 points/m², soit un pixel de 0.08 m, car elle est suffisante pour une étude de la géomorphologie locale du site. Ces données permettent de visualiser la géométrie de la mi-partie ouest de la petite vallée.

Le survol à plus basse altitude a été effectué pour acquérir une orthophotographie et un MNS à très haute résolution (Figure 5.2c et 5.2d), d'une surface d'environ 11 ha. L'orthophotographie possède une résolution spatiale de 2500 points/m², soit un pixel de 0.02 m (Figure 5.2c). Le MNS obtenu est de 625 points/m², soit un pixel de 0.04 m, sauf pour la zone de fouille qui est de 0.02 m (Figure 5.2d). Cette résolution permet d'analyser la microtopographie du site et de la zone découpée durant la fouille.

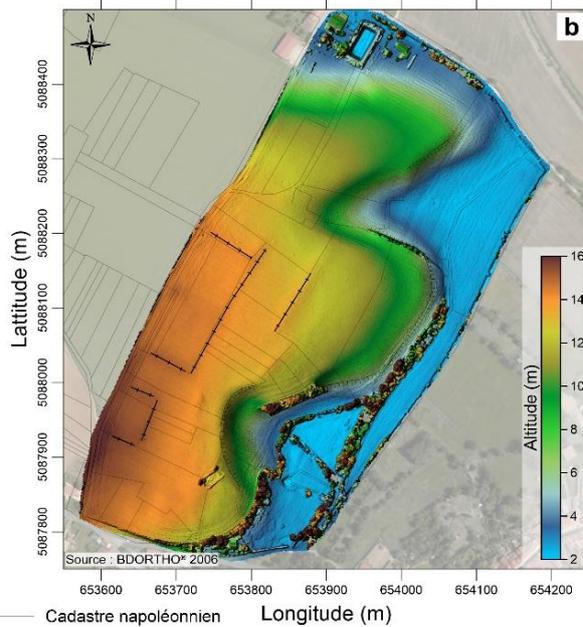
Imagerie par drone : vol à 130 m d'altitude
Orthophotographie à 4 cm de résolution



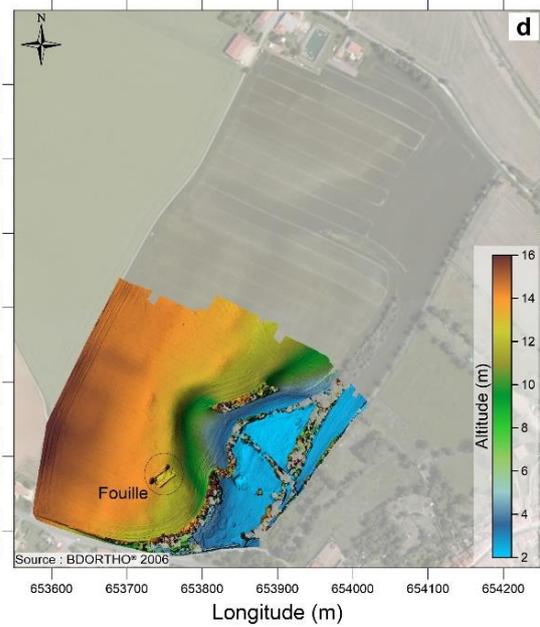
Imagerie par drone : vol à 58 m d'altitude
Orthophotographie à 2 cm de résolution



Modèle numérique de surface à 8 cm de résolution



Modèle numérique de surface à 4 cm de résolution



- Cadastre napoléonien
- Parcellaire
- Paléo-falaise

Figure 5.2 : Imagerie aérienne par drone. (a) Orthophotographie à 4 cm de résolution spatiale superposée au cadastre napoléonien de 1824 (Archives Départementales de la Charente-Maritime). (b) MNS à 8 cm de résolution spatiale. (c) Orthophotographie à 2 cm de résolution spatiale. (d) MNS à 4 cm de résolution spatiale.

CHAPITRE IV

-

Développement méthodologique à l'échelle d'un site archéologique

1 PROSPECTION MAGNÉTIQUE À HAUTE RÉOLUTION ET HAUTE PRÉCISION DE POSITIONNEMENT

L'orthophotographie du site montre la présence d'une enceinte fossoyée composée de quatre fossés discontinus et subparallèles (Figure 1.1a). Une première campagne de prospection magnétique a été effectuée en août 2014 sur ces fossés avec un gradiomètre de type fluxgate (FEREX, *Foerster Institut*) selon un protocole standard d'acquisition (Figure 1.1b). La carte du gradient magnétique verticale résultante confirme la présence de l'enceinte fossoyée et précise la forme de ses fossés. Cependant, le microrelief ne permettait pas de garder une vitesse de marche constante induisant des effets de « zigzag » entre les profils d'acquisition. De plus, la sensibilité de ce gradiomètre, de l'ordre de 0,3 nT, n'est pas suffisante pour détecter les plus faibles anomalies telles que des petits trous de poteau d'un diamètre inférieur à une quarantaine de centimètres. Pour acquérir une carte avec une meilleure qualité de positionnement et une sensibilité accrue, un protocole original de prospection magnétique à haute résolution et haute précision de positionnement a été testé sur ce site. Ce protocole utilise conjointement deux magnétomètres de meilleure sensibilité (0,1 nT) et une station totale pour le positionnement des mesures magnétiques.



Figure 1.1 : (a) Orthophotographie du site néolithique du Pontet. (b) Carte des anomalies du gradient magnétique acquise en août 2014 et les différentes zones de prospection A, B, C, D et E délimitées lors de l'acquisition avec le protocole original de prospection magnétique.

La prospection magnétique avec ce protocole original a été réalisée durant le mois de mai 2015. La parcelle était alors un champ cultivé de maïs à l'état de pousses hautes de 10 à 20 cm. Les différents opérateurs n'ont pas eu besoin d'implanter un carroyage : ils se sont repérés en passant entre les rangs de maïs. La prospection a été faite sur quatre jours et divisée en cinq zones : A, B, C, D et E (Figure 1.1b). Chaque zone correspondant à un changement de la position de la station totale.

1.1 DATA PROCESSING CHAIN TO HIGH SPATIAL RESOLUTION MAGNETIC SURVEY

Cette partie correspond à l'article accepté dans la revue international *Archaeological Prospection*. Il traite du protocole original de prospection magnétique à haute résolution spatiale et haute précision de positionnement. Les appels aux figures dans l'article sont propres à ce dernier. Les figures sont nommées : « AP-Figure ».

Data Processing Chain for High Spatial Resolution Magnetic Survey: Application on the Neolithic Site of Le Pontet (Charente-Maritime, France)

Data Processing Chain for High Spatial Resolution Magnetic Survey

GUILLAUME BRUNIAUX^{1*}, VIVIEN MATHÉ¹, FRANCOIS LÉVÊQUE¹, ADRIEN CAMUS^{1,2} AND VINCENT ARD³

¹ University of La Rochelle - CNRS, UMR 7266 LIENSs, 2, rue Olympe de Gouges, F-17000 La Rochelle, France

² ADERA – Agφ vaLoR, 2, rue Olympe de Gouges, F-17000 La Rochelle, France

³ CNRS – University of Toulouse, UMR 5608 TRACES, 5, allées A. Machado, F-31058 Toulouse, France

*Correspondence to: G. Bruniaux, University of La Rochelle, UMR 7266 LIENSs, 2, rue Olympe de Gouges, La Rochelle F-17000, France. E-mail: guillaume.bruniaux@univ-lr.fr

Key words: data processing; high precision; magnetic survey; magnetic anomaly; Neolithic; causewayed enclosure

ABSTRACT:

This paper focus on an original magnetic survey protocol and its data processing chain. The use of a high sensitive magnetometer combined with a motorized total station permits production of a magnetic map with a high spatial resolution and a high precision of magnetic and positional measurements. The data processing enhances the final magnetic map by the removal and restoring the outlier values, measurement errors and magnetic disturbances. The magnetic survey was undertaken on the Neolithic site of Le Pontet at Saint-Nazaire-sur-Charente (French Atlantic coast, between Bordeaux and La Rochelle). The site was chosen for geographical and archaeological characteristics such as its settlement period, the topography and the presence of different magnetic disturbances (proximity to roads and residential area).

The data processing is mainly made on ungridded data and the gridding is the second to last step. The last step is to correct the relative height variation of the sensors between the prospecting lines (tracks) induced by the topography and operators. The use of a motorised total station allows accurate height determination of the sensors and an upward continuation is performed to correct the slight magnetic intensity variation induced by the relative height variation of the sensors.

The results of the magnetic map bring out several causewayed enclosures, pits and postholes. This map will serve as working basis for interdisciplinary studies and future archaeological studies of this site.

INTRODUCTION

Since the second half of the last century, the geophysical survey applied on archaeological sites has shown its efficiency for locating and characterisation of archaeological structures. This discipline assembles various methods (electric, electromagnetic and magnetic) for mapping the contrasts in physical properties existing between buried archaeological structures and the surrounding area. The coupling between them gives complementary information by imaging of buried structures via their physical properties. Nevertheless, magnetic survey is the most common method for its ease of implementation, effectiveness and quality of results (Ard *et al.*, 2015b). The magnetic method measures the local deformations of Earth's magnetic field induced by buried structures with magnetic properties. These deformations are so-called "local magnetic anomalies".

In studies of Neolithic sites, archaeological structures have various size and magnetic intensity ranging from the largest (causewayed enclosure) to the more intense (hearth, burned structure) and the smallest and weakest (posthole). To obtain a quality magnetic map, the researchers use various types of sensors which have different sensitivity and various acquisition devices, such as pseudogradient configuration (Eder-Hinterleitner *et al.*, 1996; Ciminale and Loddo, 2001; Ard *et al.*, 2015) or duo- and quadro-sensor configurations (Becker, 2001; Gallo *et al.*, 2009) in order to measure the magnetic signals of lower intensity while keeping a reduced signal/noise ratio. The magnetic survey is also a sensitive method to natural or anthropogenic magnetic disturbances (Mathé *et al.*, 2006). It requires advanced data processing to recover as much possible information on archaeological structures. Many authors consider these topics for characterising disturbance sources and errors and also propose algorithms to correct them (Eder-Hinterleitner *et al.*, 1996; Ciminale et Loddo, 2001; Gallo *et al.*, 2009). These processing steps show their effectiveness and utility for the enhancement of the magnetic map and their interpretation.

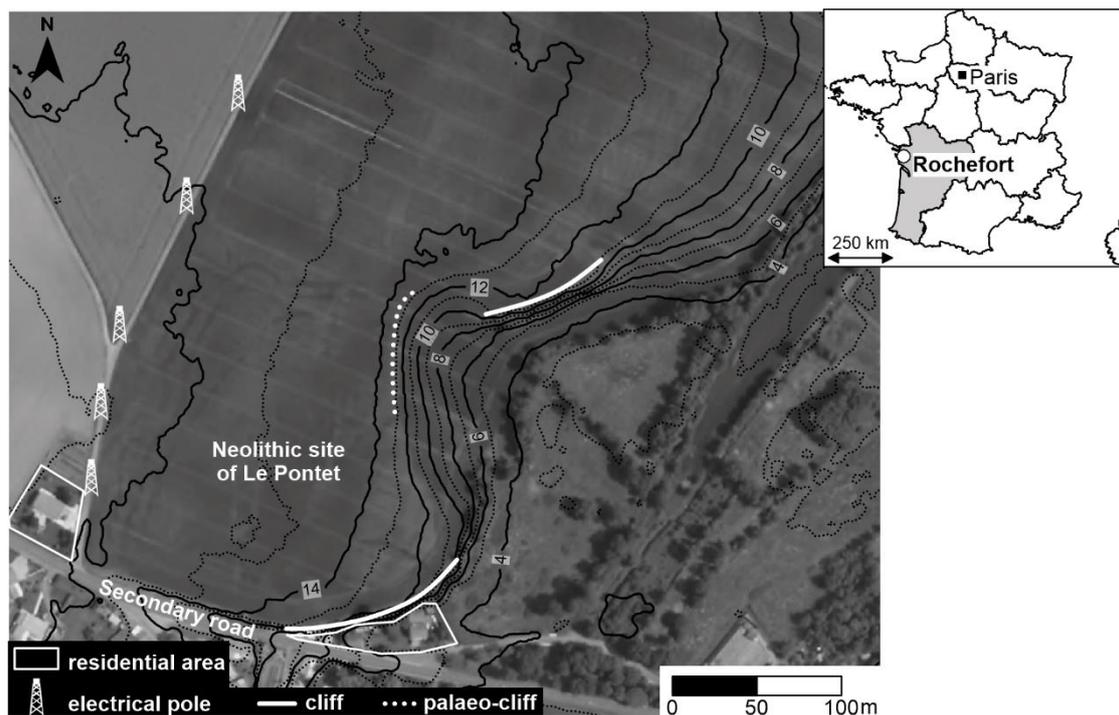
The sensitivity of sensors is a quality criterion and the positioning of magnetic measurements is another. However, the micro-relief and the non-constant walking speed of operators generate "zig-zag" effects on magnetic map. Processing has been proposed and undertaken to correct those effects (Eder-Hinterleitner *et al.*, 1996). Nevertheless, in the last few decades, researchers use complementary instruments for recording the location of magnetic measurements such as real time GPS (Gaffney *et al.*, 2008) or total station (Lehmann et Green, 1999; Böniger et Tronicke, 2010; Ard *et al.*, 2015b). The coupling between magnetometer and total station allows production of a magnetic map with high spatial resolution and high precision on magnetic measurements and positioning.

This paper focusses on a data processing chain obtained from an original protocol of high spatial resolution and high precision magnetic survey by coupling between an optical pumped magnetometer and a motorised total station. A Neolithic site was chosen to test this protocol due to its archaeological and geographical characteristics (Bruniaux *et al.*, 2015): the causewayed enclosure of Le Pontet (Saint-Nazaire-sur-Charente, France).

The data processing chain of this original protocol is composed by four steps. First, the processing of the positioning dataset (measured by the total station) and secondly the magnetic dataset (measured by the magnetometer) independent of one another. Thirdly, the merging of the two datasets allows to the assignment of spatial coordinates to magnetic measurements. Finally, the data gridding and gridded magnetic data processing permit the enhancement of the magnetic map. The aim of this data processing chain is to obtain a map of magnetic anomalies with high quality and high precision. This map gives information on the location and the geometry of archaeological structure of the site of Le Pontet. It will serve as a working basis for interdisciplinary studies of this archaeological site (Bruniaux *et al.*, 2015)

PRESENTATION OF THE SITE

The Neolithic site of Le Pontet at Saint-Nazaire-sur-Charente (Charente-Maritime, France) is situated near the estuary of the River Charente and close to the city of Rochefort (AP-Figure 1). It was identified on aerial photographs showing the presence of four subparallel and discontinuous ditches. Their morphology and material found on the surface indicate that they correspond to the late Neolithic period.



AP-Figure 1 : Location of the town of Rochefort on the map of France (GEOFLA® 2015 – IGN). Digital orthophotography of the Neolithic site of Le Pontet (BD ORTHO® 2006 – IGN) showing the presence of a causewayed enclosure composed by four continuous and subparallel ditches. The elevation contour lines are extracted from the elevation numerical model of LIDAR (light detection and ranging) imaging (Litto3D® 2011 – IGN). The ditches slam shut on the palaeo-cliff and limestone cliffs (vertical limestone escarpment).

The site is established on a limestone cliff bordering a small valley leading to the River Charente. This produces a significant topographic change on the east side of the map. The geological context is characterised by a limestone substratum outcropped on the plateau and valley sides. The valley

floor corresponds to a wetland (Bourgueil *et al.*, 1972). Thus, the survey was carried out on soil developed on the limestone substratum and, therefore, the magnetic signal is low. Indeed, the processes of magnetic enhancement of topsoil developed on poorly magnetic parent-rock are of pedogenic origins by neoformation of magnetic minerals (Thompson and Oldfield, 1986; Maher, 1998; Mathé and Lévêque, 2003). In this context, the magnetic properties of buried archaeological structures (such as ditches, pits or postholes) are higher than the limestone surrounding and the soil. The magnetic signal is induced by the nature of the fill. The interdisciplinary study on the site of Bellevue shows that the internal ditches had served as waste disposal zones (filled by ceramics, burned materials and others) which was the principal source of the high magnetic signal (Ard *et al.*, 2015b).

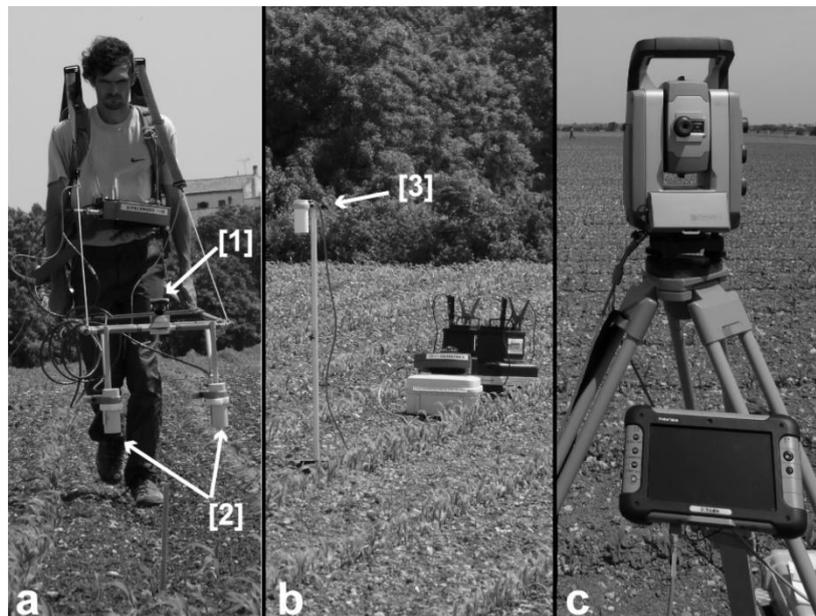
The survey area corresponds to a cultivated plot (corn sown five weeks before the survey) near a secondary road and residential areas. Soil tillage, road traffic and modern infrastructures are constraints to magnetic survey at the site, and prospecting there required development of processing to correct these various disturbances. The aim is to extract maximum information on the magnetic anomalies associated to the buried archaeological structures.

DEVICES AND DATA ACQUISITION PROTOCOL

The magnetic survey protocol with high spatial resolution and high precision uses two devices which operate independently of one other (Figure 2). The measurement of total magnetic field, expressed in nanotesla (nT), is performed by a G-858 magnetometer (*Geometrics*) with two caesium vapour sensors placed in duo-sensors configuration (Becker, 2001) and horizontally spaced 0.39 m apart (so called “mobile magnetometer” or “mobile”, Figure 2a). The spacing corresponds to half-width between two rows of corn (spaced 0.78 m) and the height of the mobile sensors is 0.34 m above soil. The sensitivity of the sensors is about 0.1 nT (Mathé *et al.*, 2006). Total magnetic field values were corrected for temporal variations related to solar activities (diurnal variations of Earth’s magnetic field) using another G-858 magnetometer (Figure 2b). The second magnetometer is located at a base-station (so called “base magnetometer” or “base”) and far from any magnetic disturbance (transmission line, road, residential area and others). The height of the base sensor is about 1 m above soil. The two magnetometers recorded 10 measurements per second. The position of each magnetic data point was determined by a motorised total station (S8, *Trimble*; Figure 2c) with an error of a few millimetres (Trimble, 2015). A reflector (360° prism) is placed between the two mobile sensors (Figure 2a) and reflects the laser beam transmitted by the total station (Figure 2c). So, the total station tracks automatically the reflector and operated at 20 measurements per second.

The mobile magnetometer recorded only the total magnetic field according to the time but without positional data. The positions were acquired by the total station. For this survey, the rows of corn served as prospecting lines (Figure 2a). The operator followed these rows and uniformly covered the area without a survey grid. During the passage of the operator along a row of corn, two parallel

profiles of magnetic data are performed in the same direction associated with one profile of positional data (so-called track). So, one track (reflector positional dataset) corresponds to two profiles (magnetic dataset for each sensor, left and right).



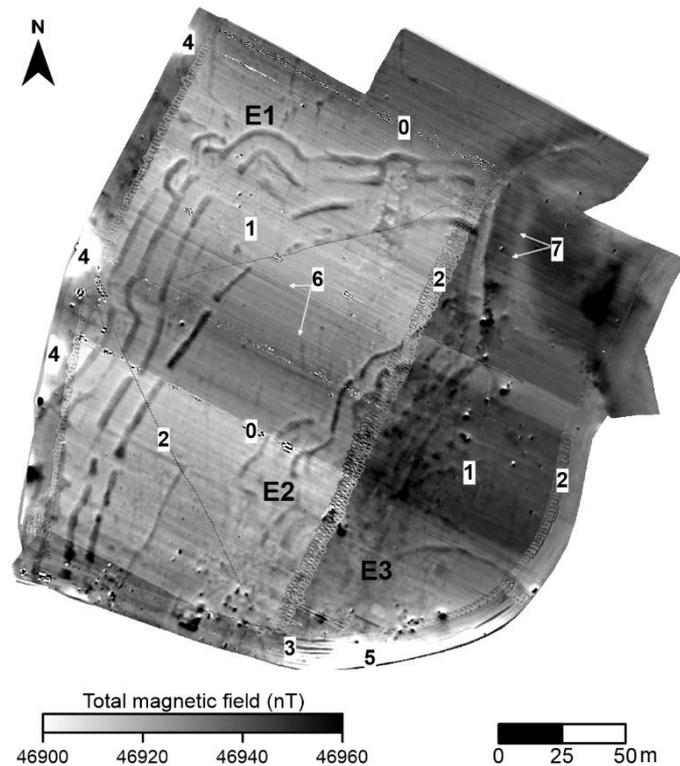
AP-Figure 2 : Magnetic and positional measurement devices. a: G-858 magnetometer (Geometrics) with two caesium vapour sensors, horizontally spaced 0.39 m apart [2]. Reflector placed between the two sensors [1]. b: G-858 magnetometer disposed in base-station [3]. c: motorized total station (S8, Trimble).

The motorized total station and the mobile magnetometer operated independently of one other. Magnetic and positional measurements were saved in two different files with the common variable being the recorded times (but the instrument clocks have a temporal offset between them). To combine the two datasets, a *synchronisation phase* is carried out at the beginning of the survey. The principle is to correlate a magnetic signal with a displacement. To make this correlation, a sweeping movement of the sensors is performed in the direction of a magnet. Thus, the mobile records the amplitude variation of the magnetic signal (linked to remoteness and becoming closer to the magnet) and the total station records this movement (Ard *et al.*, 2015; Lévêque and Mathé, 2015). A second *synchronisation phase* is also applied between the mobile and base magnetometer. The correlation is performed by a back and forth movement of iron rod in the direction of the sensors of the two magnetometers, generating magnetic peaks of high amplitude.

RESULTS AND DATA PROCESSING

The assembly of magnetic and positional data is performed in post-processing. The first *synchronisation phase* is used for merging these two datasets. This provides a map of raw magnetic data showing the presence of three large causewayed enclosures (E1 to E3, Figure 3). This map has different sources of error and disturbances. Thus, a magnetic and positional data processing chain was created with the aim to enhance readability, quality and precision of this magnetic map. This data processing

chain is composed of three main steps processing of positional data, processing of magnetic data and processing of merged data (assembly between magnetic and positional dataset).



AP-Figure 3 : Map of assembled raw magnetic and positional data showing the various sources of noise and errors: (0) outlier magnetic values ; (1) the diurnal variation of Earth's magnetic field; (2) circular paths of track changes and displacements outside the survey areas; (3) incorrect positions in the bend (the rows of corn follow the edge of the plot); (4) anomalies linked to electrical poles; (5) anomalies linked to residential area; (7) line shift effects associated to soil tillage; (7) line shift effects associated to the relative height variation of the sensors.

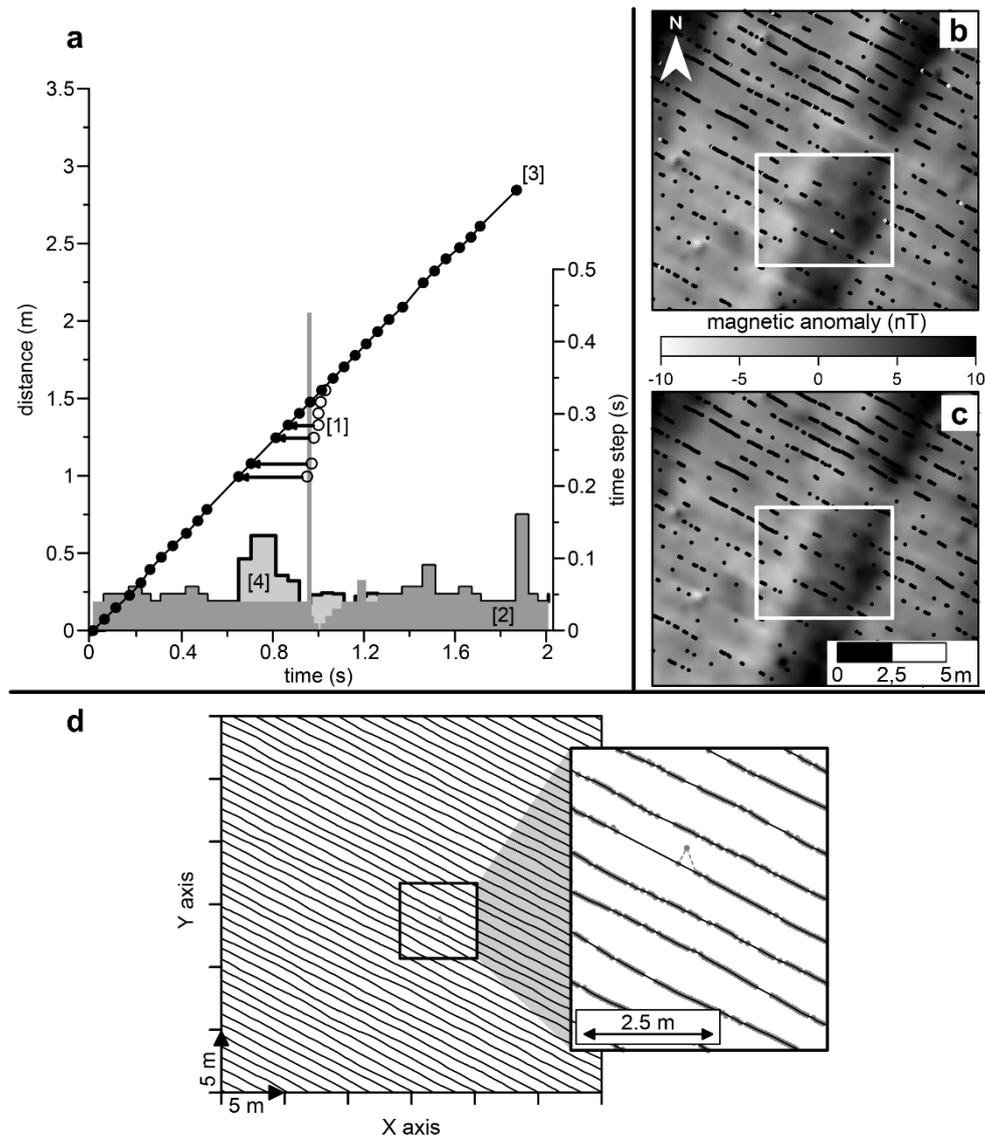
A. PROCESSING OF POSITIONAL DATA

The processing is to correct and to eliminate the positions with errors to limit the presence of positioning artefacts. The removal of these will create a good “readability” of the final magnetic map while avoiding interpretation errors.

1. Time errors

The total station gives two sets of information: reflector positions (three-dimensional reference) in local coordinate system and the time. The sampling frequency is about 20 Hz (the time step is about 0.05 s). In particular circumstances, on some successive positions (about five points i.e. a distance less than one meter), the recorded time is incoherent because the time step is less than 0.03 s and even zero (same time between two positions). Nevertheless, the location of these positions and the distance between two successive positions are in the trend toward neighbour positions. Thereby, the recorded time is incorrect. It is necessary to recalculate this according to the cumulative distances between two successive positions. The Figure 4a shows the cumulative distances according to the time focussed on a time step anomaly. To correct this, the incorrect times are recalculated using a linear interpolation which takes into account the cumulative distances. As the assignment of coordinates to magnetic measurements

depends on the time of the two datasets, it is essential that the time of each position is correct. The Figure 4b shows an extract of magnetic map with a time step anomaly (white rectangle) without correction. So, there are positional artefacts corresponding to an “overgrowth” of the ditch magnetic anomaly. The Figure 4c shows the same map but the time steps are corrected. The artefact is clearly reduced.



AP-Figure 4 : Processing of positional data. A time step anomaly of positional data. a: graph of the cumulative distance between two successive positions according to the time and focussed on a time step anomaly. The white dots [1] are positions with incorrect times and time steps [2]. The correction of these incorrect times (black arrows) permits a time-distance relationship in the trend toward the neighbour points [3] and with standard time steps [4]. b: extract of the magnetic map with a time step anomaly (white rectangle). The black dots are the positional data and the isolated white dots correspond to the location with a time step anomaly. c: magnetic map with the correction of time step anomaly. d: positional data of the reflector. The grey lines are the raw positional data and the black lines are the processed positional data. The enlargement is focussed on two isolated points corresponding to outlier positions. No location corresponds to a reflector tracking loss by the total station.

2. Incorrect positions

Another positional error is also present and corresponds to isolated points which are not in the trend toward neighbour positions (remote points of about 1 m), as shown on Figure 4d. These positions

are identified as outliers because there are highly remote from their neighbours. Thus, a point is an outlier when its position is not in the trend toward the neighbours. The trend is characterized by the ratio of the sum of the distances between the analysed position and the two neighbours (posterior and anterior positions), and the distance between the two neighbours only. This ratio is near to one when the three positions are aligned and higher than one when they are not aligned (it digresses from the trend). A second discrimination criterion is used and corresponds to the difference between the sum of the distances between the analysed and neighbour positions, and the distance between the two neighbour positions. This difference trends to zero when the positions are aligned. Thus, these two discrimination criteria eliminate these outlier positions and avoid positional errors on the magnetic measurements once the datasets are merged.

B. PROCESSING OF MAGNETIC DATA

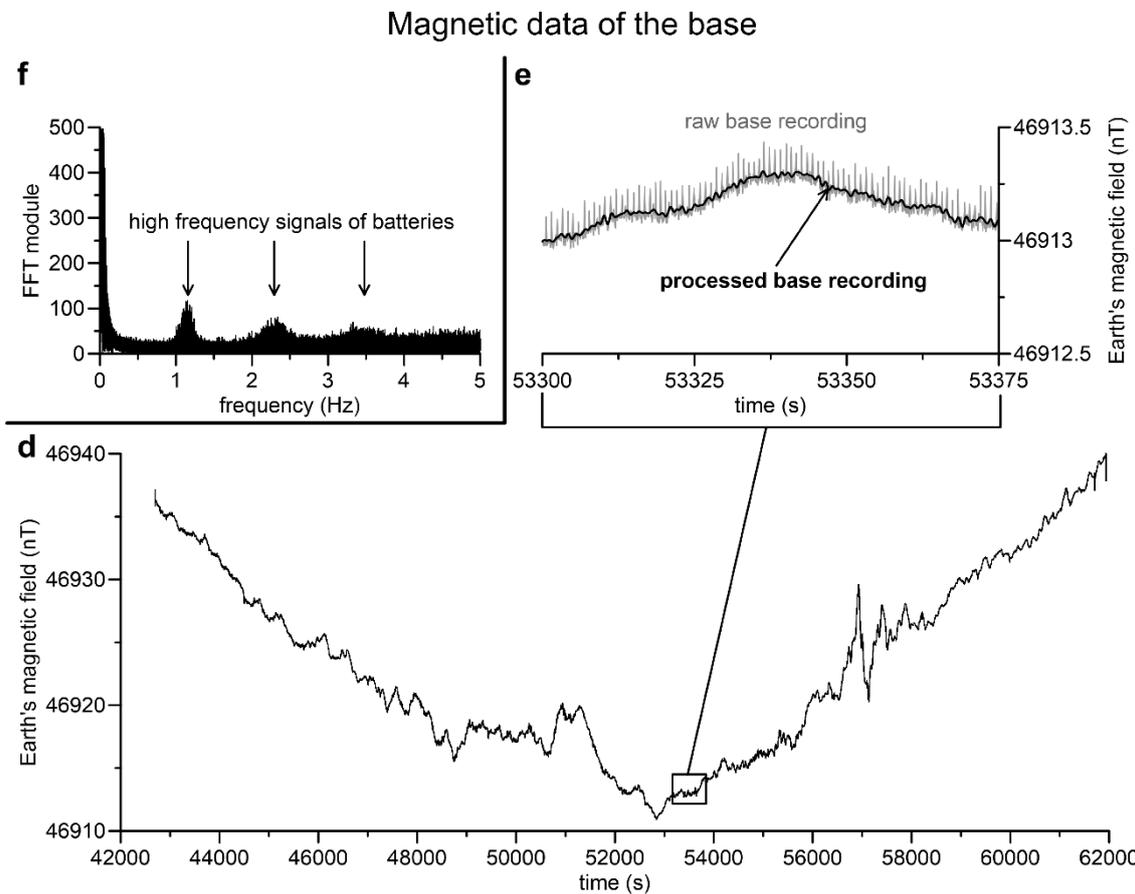
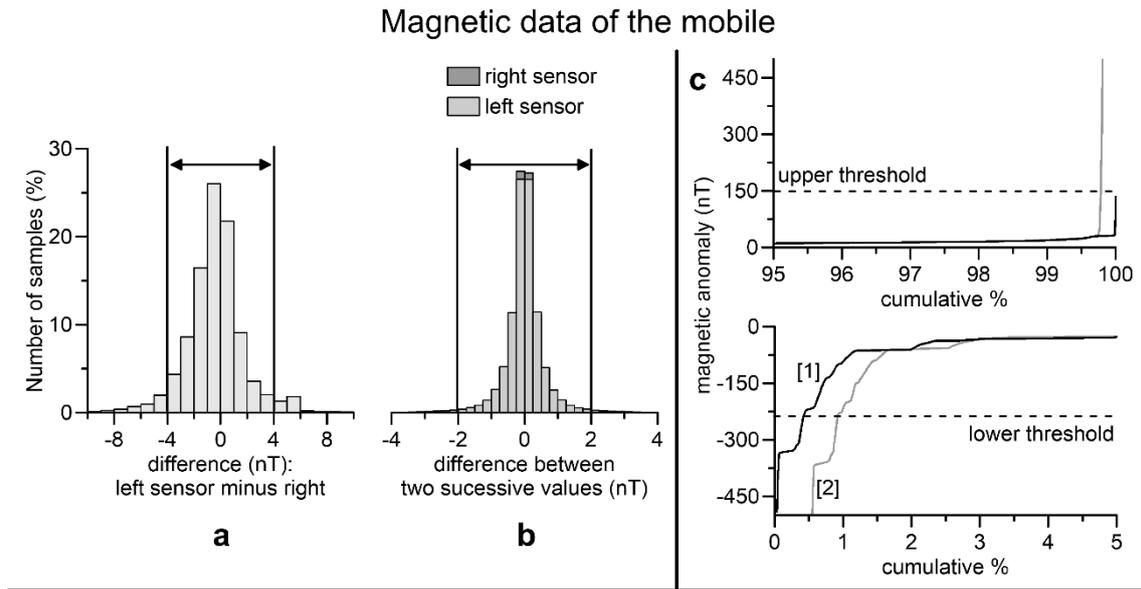
1. The mobile dataset

Mobile magnetic data have also outlier values and errors (Figure 3, [0]). These values have different origins such as instrumental errors, ground roughness, small metal objects (nail, wire, etc.) and others. Many authors had developed various processing to eliminate and correct these errors to obtain a quality magnetic map (Eder-Hinterleitner *et al.*, 1996; Becker, 2001; Ciminale and Loddo, 2001; Gallo *et al.*, 2009). Thus, it is essential to process the magnetic data and we use three discriminate criteria to identify and remove outlier values (Figure 5):

- The first criterion is the difference between the two magnetic values recorded by sensors (left and right) for the same measurement (Figure 5a). An exclusion threshold is established according to this criterion. The threshold is taken between the percentiles 5 and 95%. A strong difference does not necessarily imply the presence of an outlier value and does not identify whether it is the right or left sensors that has an outlier value. So, a second criterion is established to determine the outlier value.
- The second criterion is the analysis of the magnetic value behaviour with those neighbour values. The analysis consists of examining the difference between two successive magnetic measurements (Figure 5b). It works on dataset from the left and right sensors independently of one another. The exclusion threshold is defined by the statistical repartition of this criterion and it is taken between the percentiles 1 and 99%. This allows us to remove the values which are not in the tendency of the neighbours.
- The third criterion is the thresholding of measurements which are outside of lower and upper threshold defined by extrema percentiles (generally 1 and 99 %) or by the user (Figure 5c).

The thresholds of the three criteria have been established to remove the maximum outlier data without affecting the others and they can be changed according to magnetic dataset. At the end, a visual control is required in order not to delete correct data. After this processing, mobile magnetic data are

cleaned of their outlier values. Thus, they are ready to be corrected to the diurnal variation of Earth's magnetic field via the base recording.



AP-Figure 5 : : Processing of magnetic data. Statistical representation of the three exclusion criteria for the magnetic data processing of the mobile. a: histogram of differences between the two sensors for the same measurement (right sensor minus left sensor). b: histogram of differences between two successive magnetic measurements for the right and left sensors. c: cumulative curve of the magnetic data for the right [1] and left [2] sensors. Magnetic data processing of the base. d: the diurnal variation of Earth's magnetic field during a recording day (amplitude of 30 nT). e: an enlargement of the base signal showing the raw and processed base recording. f: representation of the fast Fourier transform of the base magnetic data.

2. The base dataset

The base records the diurnal variations of Earth's magnetic field (Figure 5d). To reduce the diurnal correction error of the mobile data, outlier values are removed. The processing is the analysis of the magnetic value with respect to its neighbour values (the same processing used for the mobile data).

We have used two 12V car batteries plugged in a series to record the base signal during 10 hours without break but these generated unwanted signals (Figure 2b and 5e). Indeed, three peaks of about 0.1 nT are identified, ranged between 1-1.3 Hz, 1.9-2.6 Hz and 3.25-3.75 Hz (Figure 5f). So, a frequency-domain filtering based on fast Fourier transform (FFT), is used to filter these periodic signals (Figure 5e and 5f).

After the removal of the outlier values from mobile and base datasets, correction of diurnal variation can be performed (Figure 3, [1]). The *synchronisation phase* between the mobile and base magnetometers is used to determine the temporal offset between the two instrument clocks to match the times. This allows correction of the diurnal variation which consists of subtracting mobile values from base values (via the common times).

Overall, the magnetic data processing allows removal of outlier values and the diurnal variation. Thus, the mobile magnetic and positional datasets can be merged.

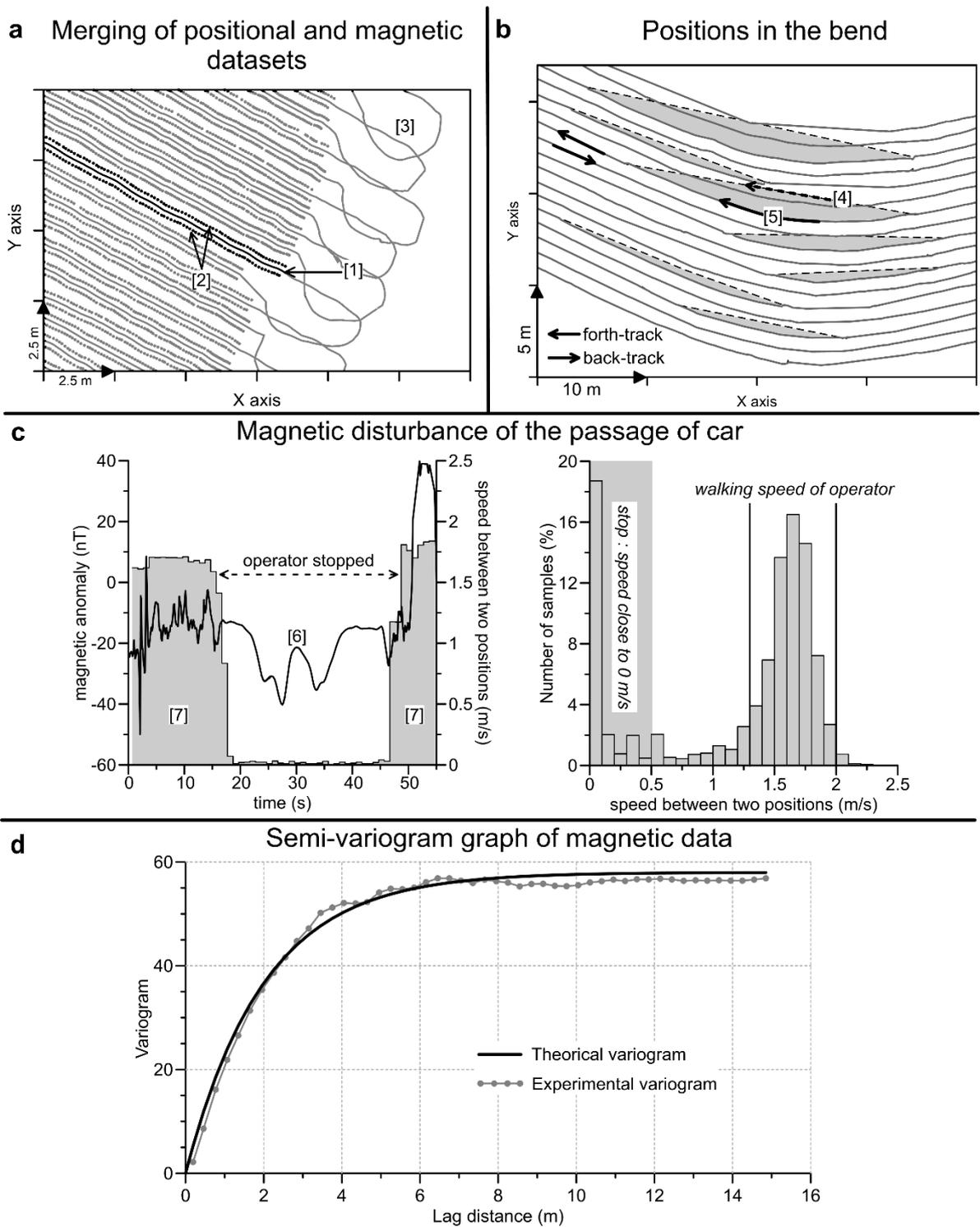
C. PROCESSING OF MERGED DATA

1. The standard processing

The merging between positional and magnetic datasets corresponds to the assignment of spatial coordinates to mobile magnetic measurements. The *synchronisation phase* between the total station and the mobile magnetometer allows the temporal offset between the two instrument clocks to match the times. The merging of the two datasets is performed via a linear interpolation taking into account the time of the mobile magnetometer, the time of the total station and the temporal offset between them. However, these spatial coordinates do not take into account the arrangement of the two sensors (left and right). The calculated spatial coordinates correspond to the reflector position when the magnetic measurement has been recorded (central to the two sensors).

In order to take account of the arrangement of the device (Figure 2a), the spatial coordinates of each sensor (left and right) are calculated. They are estimated via the positions of merged data (reflector positions of each magnetic measurement) and the distance between sensors and reflector (0.195 m, Figure 6a).

Operator displacement outside the context of prospecting and circular paths of track changes are removed (Figure 3, [2] and Figure 6a). Indeed, positional errors in the circular paths are significant (generating positional artefacts). So, only the positions of the surveyed area are used for further processing.



AP-Figure 6 : Processing of merged data. a: position data of the reflector along the tracks [1] and the positions of magnetic measurements for the right and left sensors [2]. The circular paths correspond to the track changes [3]. b: incorrect positions of merged data (without the positions of the both sensors) on the bend. Extract of the south edge of the plot with the curved shape and the tracks follow the latter. The black dotted straight lines [4] correspond to incorrect positions. The grey lines [5] correspond to the positions of merged data and positions after the correction. c: graph of the magnetic anomaly recording [6] of a metallic masse in movement (car). Step plot of the walking speed of operator [7]. The histogram of speed between two successive positions.

Thus, this standard processing enhances the quality of the magnetic map and the merged dataset is georeferenced. This operation uses reference locations located by the total station and a kinematic GPS (*Topcon*). The final positional error is a few centimetres and the average spatial resolution is about 30 points/m² (Figure 6a).

In other survey context, the dataset could be gridded to obtain a map of magnetic anomalies with high spatial resolution and high precision. However, specific processing to the site of Le Pontet are developed to correct various disturbances and they can be applied on other sites.

2. The site specific processing

For the site specific processing, the merged dataset is not gridded immediately. The gridding is performed after these steps. The aim of this processing is to restore incorrect position in the bend in the south edge of the plot (Figure 3, [3]), to remove the magnetic disturbances induced by the traffic, to correct magnetic disturbances near the electricity poles and the residential area (Figure 3, [4] and [5]) and to correct the line shift effects linked to soil tillage (Figure 3, [6]).

Correction of positions in the bend

On the south part, the rows of corn follow the edge of the plot. They have a curved shape and are characterised by successive bends (Figure 3, [3]). A correction of positions is performed on a small part of this area. The Figure 6b shows the curvature of tracks. The straight tracks on the turn correspond to the positions unrecorded by the total station but calculated during the merging of data. These positions are therefore incorrect and there are induced by poor location of the total station. Indeed, the total station had a dead angle in this area generated by the operator impeding the reflector tracking during one direction. For the other track, the operator did not impede the reflector tracking. Thus, straight tracks are incorrect and they are recalculated to restore them in curved shape. This correction is performed by a translation of an incorrect position to the nearest position on the next track perpendicularly to this one. The distance between two tracks (distance between rows of corn, Figure 2a) and the distance between the incorrect position and the nearest position on the next track are taken into account to calculate the new position. Thus, this translation restores an estimate curved shape to straight tracks (Figure 6b).

Removal of magnetic disturbance due to traffic

All disturbances associated to metallic masses in movement (car, truck, train, airplane and others) must be avoided. Traditionally (without the use of total station or other positioning system independent of magnetometer), during the passage of cars, the operator must repeat the current track in order not to record the associated magnetic disturbance. The site of Le Pontet is near a secondary road with significant traffic (Figure 1) and this is a stumbling block to magnetic survey. In our case, the operator does not repeat the track but he stops the walk. Thereby, the disturbance is recorded but is removed in post-processing. To remove it, the processing consists of identifying the speeds (or distances) between two successive positions that are close to zero (unmoving operator). The AP-

Figure 6c shows the passage of car with the recording of its magnetic disturbance and the speed operator. The histogram of speeds between two successive positions allows a threshold below which the displacement of operator is considered as stationary (0.5 m/s).

Correction of magnetic anomalies near to electricity pole and residential area

Magnetic disturbances associated with electricity poles (AP-Figure 3, [4]) and residential area (AP-Figure 3, [5]) are visible on the raw magnetic data map. On the magnetic disturbance linked to residential area, median difference filtering by a moving filter are performed. The filtering is undertaken on ungridded data and corresponds to a nearest neighbour clustering algorithm within a radius of two metres around the position to correct. The median of neighbour positions is an estimation of the magnetic disturbance of the considered position. Thus, median difference is used to retrieve an estimation of the magnetic intensity undisturbed by the residential area. However, soil and geological magnetic signal is attenuated and a discontinuity appears between corrected and uncorrected zone (disturbed and undisturbed zone by the residential area, respectively). So, a shift of magnetic values is applied on the corrected zone to limit the readability of the discontinuity between the corrected and uncorrected zone.

On the magnetic disturbances linked to electricity poles (AP-Figure 3, [4]), the spatial variation of magnetic intensity in the direction of electricity pole is very important. Median difference filtering is less effective. Furthermore, these magnetic disturbances affect the ditch magnetic anomalies and the median difference filtering induces an important attenuation of these signals. So, another process is performed. An estimation of magnetic intensity due to an electricity pole is related to the distance from the source (no modelling is possible as the magnetic anomaly of an electricity pole is complex with the presence of reinforced concrete and transformer). A trend curve is established from a set of radial profiles which have as origin the source of the magnetic disturbance; this corresponds to the area with the highest magnetic gradient. The trend curve corresponds to an exponential function where the magnetic disturbance intensity tends toward zero when the distance source-position tends toward infinity. An influence radius is estimated to identify the magnetic values which are to be corrected (increase of magnetic gradient around the disturbance source, radius between 15 and 30 m). This correction limits the attenuation of soil, geological and ditch magnetic anomalies and they are not a discontinuity between the corrected and uncorrected magnetic positions.

Correction of line shifts linked to soil tillage

Line shift effects are visible on the map of raw magnetic data (AP-Figure 2, [6]). They correspond to magnetic intensity shifts between profiles and tracks. These line shift effects are mainly induced by the soil tillage and ground compaction by agricultural machinery. Both generate variations of concentration of magnetic minerals and a terrain roughness (Mathé and Lévêque, 2003). As the prospecting lines correspond to the rows of corn, soil tillage effects result in variations of magnetic intensity parallel to the ploughing direction. These variations correspond to a mean magnetic intensity slightly different between two profiles for the same track. To correct these line shift effects, a zeroing

of the median of differences between the left and right magnetic measurements for the same track is performed. Thus, one of the two profiles are raised or dropped by determining the shift between the median of the difference between two profiles and the zero position.

The line shift effects linked to the topography and variation of height sensors (AP-Figure 3, [7]) are corrected on gridded magnetic data. The processing on the ungridded data are finished and the last steps are processing on gridded magnetic data.

D. GRIDDING AND GRIDDED MAGNETIC DATA PROCESSING

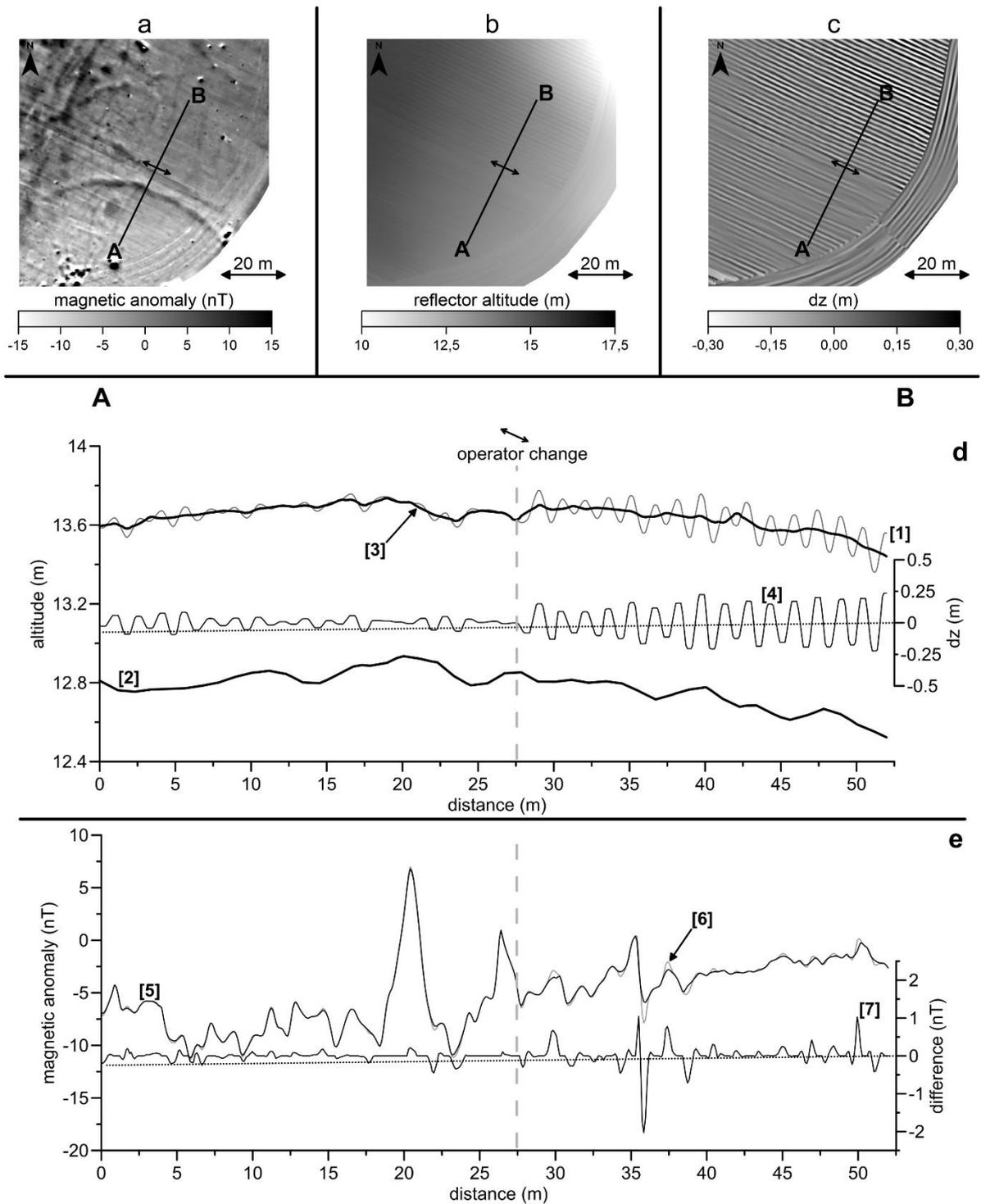
The processed and merged magnetic datasets are gridded (grid spacing: 0.1x0.1 m) to obtain a map of magnetic anomalies. The interpolation algorithms mostly used for magnetic data are the minimum curvature (Smith and Wessel, 1990) and the kriging gridding methods (Krige, 1951). These two gridding methods are adapted to datasets with irregular spatial continuity (such as the presence of small anomalies of high intensity). The kriging is a gridding method which takes into account the spatial continuity of the dataset via the variogram (not linear for magnetic data) and it limits the continuity of small spatial irregularities while retaining the local tendency of soil magnetic properties (Hao *et al.*, 2012). However, considering the high spatial resolution (30 points/m²), the difference between magnetic maps, obtained by these two gridding methods, is very low.

For this study, the gridding method is the ordinary kriging. It has been chosen because the kriging algorithm minimise the variance of estimate of grid nodes by taking into account of distances between measured points and estimated grid nodes, the distances between measured points and the spatial continuity of the magnetic data, characterised by the variogram (Haas and Viallix, 1976). Furthermore, the magnetic locations are irregularly spaced and the profiles are not in the same direction (rows of corn on the edge are parallel to boundaries of the plot).

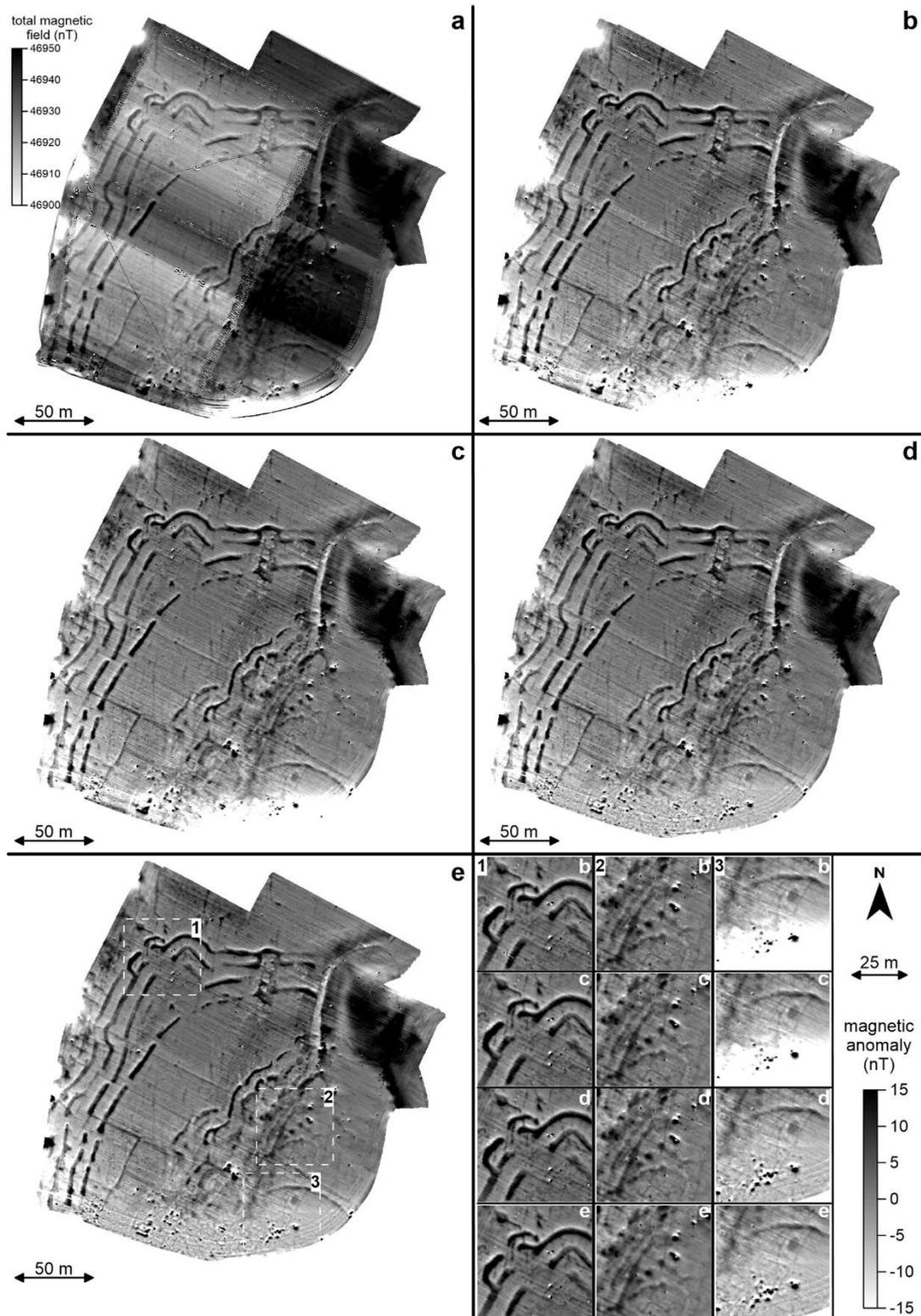
The spatial continuity of the magnetic data is determined by the experimental variogram. The semi-variogram graph is shown on the AP-Figure 6d and the experimental variogram has been fitted by an exponential model.

1. Correction linked to topography and to relative height variation of the sensors

A height difference of sensors and a line shift effect create a zig-zag collecting between tracks (AP-Figure 7a and 7b). This height difference induces a height variation of sensors relative to the ground. This is associated with the micro-relief, the topography and the arrangement of the device (the sensors and the reflector are placed about 1 m in front of the operator, AP-Figure 2a). The measured magnetic intensity is dependent on the source-sensor distance and comes from the magnetizations of various sources in the soil (principally magnetic minerals; Mathé and Lévêque, 2003). Thereby, line shift effects create variability between tracks (AP-Figure 3, [7] and AP-Figure 7a and 7b).



AP-Figure 7 : Relative height variation of the reflector (and the sensors). a: extract of the map of magnetic anomalies and the location of the profile AB (perpendicular to the tracks). The double arrows indicate the operator change and the direction of the tracks. b: extract of the map of the reflector altitudes measure by the total station. c: extract map of the dz corresponding to the height difference of reflector between tracks. d: the height variations of the reflector along the profile AB [1] and a slice of the digital elevation model of lidar imaging [2]. The profile of corrected reflector heights [3] corresponds to the profile of reflector height [1] which is corrected by the relative height variations of the reflector (and the sensors) [4]. The dz [4] corresponds to the height difference of reflector between a track and these two neighbour tracks. e: the profile AB of the processed magnetic data to the relative height variation of the reflector (and the sensors) [5] and the profile of magnetic data without correction [6] and the difference between the corrected and uncorrected profiles [7]. The difference is a few nanotesla (mainly inferior to 1 nT) and it is more important on the part of the operator with a high relative height variation of the sensors.



AP-Figure 8 : Synthesis of the magnetic and positional data processing chain on the magnetic map of the site of Le Pontet. a: raw magnetic map without the correction of the diurnal variation of Earth's magnetic field (in total magnetic field). b: map of magnetic anomalies with the removal of circular paths and operator displacement outside the context of prospecting but without magnetic data processing. c: map of magnetic anomalies with processed magnetic data and the correction of magnetic disturbance of electrical poles. d: map of magnetic anomalies with the correction of the line shift effects linked to soil tillage and the magnetic disturbance of the residential area. e: map of magnetic anomalies with the correction of the relative height variation of reflector (and the sensors). At the bottom right of the figure, an enlargement of the magnetic map at various processing steps (location of the enlargement is indicated on the last magnetic map, white dotted rectangles).

The tracks are subparallel to the slope of the valley side (northwest southeast direction, AP-Figure 1) and this slope has an influence on the height of the sensors. Indeed, when the operator climbs the slope, the sensors are lower to the ground and higher for the downhill. Nevertheless, on the steeper slope (corresponding to the paleo-cliff, AP-Figure 1, white dotted line), the height variation of sensors is relatively low. This is a result of the operator lifting the sensors when they climb the slope and the operator lowers the sensors when they go down the slope. This adjustment was necessary to avoid the sensors touching the ground and is realised only on the paleo-cliff area (Bruniaux *et al.*, 2015). Thus, the strongest height variation of sensors is located on the gentle slope. The AP-Figure 7d shows a profile of the height variation of the sensors perpendicularly to the tracks. The location of the profile is indicated on the extract of the map of magnetic anomalies and the height of the reflector (AP-Figure 7a and 7b). The height variation is also induced by the operator and is clearly visible on this profile (AP-Figure 7d).

The theoretical height of sensors is 0.34 m above the ground (AP-Figure 2a) but this varies between tracks. Thus, the height relative variation of the reflector of a track relative to these two neighbour tracks is quantified. These height values correspond to the dz (AP-Figure 7c and 7d). The height relative variation of the reflector is more accuracy than the reflector height calculated from the digital elevation model available on the site of Le Pontet (LiDAR imaging with grid of 1 m² and a vertical accuracy of 0.2 m; IGN and SHOM, 2015).

The dz is calculated via the reflector height data (AP-Figure 7b and 7d) of a track smoothed by moving average filter (filters high frequencies associated with the gait of the operator). Thus, the dz corresponds to the height of the reflector for one position (on the track considered) subtracted by the average of the two heights of the nearest positions on the neighbour tracks (AP-Figure 7c and 7d). A negative dz corresponds to sensors nearer to the ground than neighbour positions and a positive dz corresponds to sensors farther from the ground than neighbour positions (AP-Figure 7d). These relative height variations of the reflector, and the sensors (dz), are quantified for each position and then gridded to obtain a map of dz with the same size as the magnetic map (AP-Figure 7a and 7c).

The correction of the relative height variation of the sensors is required to perform an upward continuation (Blakely, 1995) of a grid node from the magnetic map only for the tracks with the sensors are the closest to the ground ($dz < 0$, AP-Figure 7c). Upward continuation is performed using a 4x4m moving filter on the magnetic map. The height of the continuation corresponds to the dz value which has the same grid node location (on the dz map) as the central grid node of the moving filter on the magnetic map (AP-Figure 7a). AP-Figure 7e shows the magnetic profile corrected by the upward continuation and the profile without this correction. This correction attenuates the line shift effects resulting from the relative height variation of sensors linked to the topography and operators on the magnetic map.

2. The reduction to the pole algorithm

The data processing chain finishes by a reduction to the pole algorithm (Baranov and Naudy, 1964) applied to the map of processed magnetic anomalies. The reduction to the pole is a mathematical process that transforms dipolar magnetic anomalies measured at given latitude to anomalies measured in a completely vertical magnetic field. This magnetic data processing centres magnetic anomalies relative to their sources and simplify the interpretation of the magnetic map. The reduction to the pole works well for magnetic anomalies derived from induced magnetisation. For magnetic anomalies influenced by remnant magnetisation (except if induced and remnant magnetisations are collinear), these magnetic anomalies do not centre relative to their sources after application of the reduction to the pole (Blakely, 1995).

SYNTHESIS OF DATA PROCESSING CHAIN

The data processing chain is performed on a MatLab routine (*MathWorks*) and enhances the readability, the precision and the quality of the magnetic map. The steps of the processing chain are summarised on the AP-Figure 8. Five magnetic maps are represented at different processing steps and show the gradual improvement of the magnetic map of the Neolithic site of Le Pontet. The incremental improvement is also shown on the AP-Figure 9 with the residual map (absolute difference) between two magnetic maps at different processing steps. The magnetic maps of this AP-Figure are characterised by the great enclosure E1 (AP-Figure 3).

The use of the duo-sensor configuration decreases the prospecting time recording two magnetic profiles for one track (Becker, 2001; Gallo *et al.*, 2009). The coupling of this sensor configuration with a motorised total station enhances the precision of the positions of magnetic measurements. The processing of positional data erases artefacts induced by time errors and outlier positions. The erasing of these artefacts are not discussed in other papers on the geophysical survey using a total station (Lehmann and Green, 1999; Böniger and Tronicke, 2010).

The raw magnetic map (AP-Figure 8a) is difficult to interpret mainly because of the diurnal variation of Earth's magnetic field, the outlier magnetic values and the circular paths. The correction of the diurnal variation by a base-station gives better signal dynamic of magnetic anomalies than the pseudo-gradient configuration (Mathé *et al.*, 2006) or the correction by the difference of profile means (Becker, 2001). Thus, the diurnal correction, the removal of the circular paths and the removal of outlier magnetic values giving a better quality magnetic map (AP-Figure 8b and 8c). Thus, these data processing steps remove various spikes (outlier values), clearly visible on the residual map (black dots, AP-Figure 9, [1]) between the raw and processed magnetic map (AP-Figure 9a and 9b). The correction of the magnetic disturbances induced by the electrical poles and the disturbance linked to the residential area (AP-Figure 8d and 9b) enhance the "readability" and the quality of the magnetic map (AP-Figure 8c and 8d). The removal of the latter shows various magnetic anomalies which are not visible before (AP-

Figure 8, enlargement 3d). On the residual map (AP-Figure 9, [1]), the removal of the magnetic disturbances of electrical poles is characterised by halos of strong correction nearby and low correction on the edges. These halos are created by the exponential trend curves modelling these magnetic disturbances which tend toward zero on the edges.

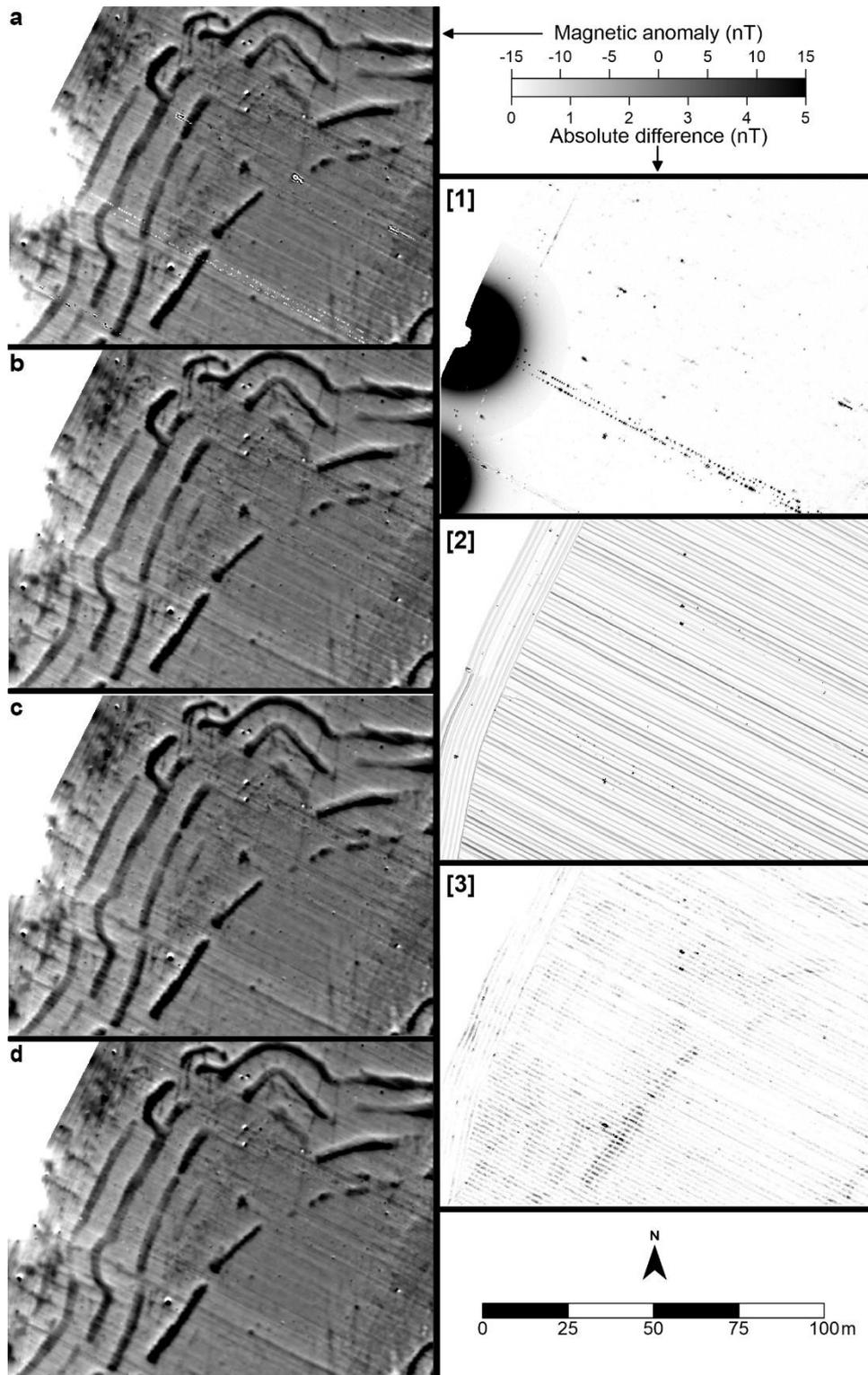
As the survey area is a cultivated plot, the soil tillage and the ground compaction by agricultural machinery generate variations of concentration of magnetic minerals inducing the line shift effects present on the magnetic map (AP-Figure 8c). The correction of these attenuates the magnetic signal induced by soil tillage (AP-Figure 8d, AP-Figure 8, enlargement 1d and 2d, and AP-Figure 9c). The correction of the relative height variation of the sensors attenuates also line shift effects (AP-Figure 8e and 9d). Both residual maps of the line shift effects (AP-Figure 9, [2] and [3]) show the corrections performed on the magnetic map and their effectiveness. The last residual map (AP-Figure 9, [3]) is associated with processing of the relative height variation of the sensors. It shows that the amplitude of the correction depends on the magnitude of magnetic anomalies (stronger on high intensity magnetic anomalies) and the relative height of sensors. Finally, corrections of the line shift highlight the lower intensity magnetic anomalies as shows on the AP-Figure 8 on the enlargement 1e, 2e and 3e.

The magnetic survey protocol and the data processing chain permit a map of magnetic anomalies with high spatial resolution and high precision of magnetic and positional measurements. The final magnetic map with the reduction to the pole is illustrated on AP-Figure 10.

CONCLUSIONS AND FUTURE WORKS

The magnetic survey was realised on an area of 5 ha. Four days had been necessary to mapping the site with this original protocol. The results of the magnetic survey bring out the causewayed enclosure visible on the digital orthophotography (AP-Figure 1) but also the presence of others ditches inside (AP-Figure 10). The Neolithic site has a large enclosure (E1) and two others inside (E2 and E3). The first enclosure (E1) has four discontinuous and subparallel ditches (D) and five entrances (I1, I2, I3, I4 and I5). The entrances are identified by an interruption of ditches and the presence of the *pinces de crabe* (crab's pincer, C) which corresponds to small ditch which has an incurved shape and joins the external ditch (Ard et al., 2015b). In this entrance, several small isolated magnetic anomalies of low intensity could be interpreted as postholes (AP-Figure 8, enlargement 1e and AP-Figure 10) as has been demonstrated on the Neolithic site of Bellevue (Ard et al., 2015b). The second enclosure (AP-Figure 10, E1) is located inside the first (E1) and is composed of two discontinuous and subparallel ditches. They have five small entrances (I6, I7, I8, I9 and I10) and *pinces de crabe* are identified on the first entrance (I6). The third enclosure (E3), inside the second (E2), is characterised by a unique continuous ditch. Four pits (P) inside the second enclosure and one pit inside the third are identified. In September 2016, the first four pits have been excavated on the basis of the magnetic survey (Mathé and

Ard, 2016). The results will improve the interpretations of the magnetic map, currently based on geophysical data and the analogy with the Neolithic site of Bellevue (Ard *et al.*, 2015b).



AP-Figure 9 : Enlargement of the northern part of the magnetic map at various processing step (left part) and the residual maps between two processing steps (right part). a: magnetic map with the removal of circular paths and operator displacement outside the context of prospecting but without magnetic data processing. b: magnetic map with processed magnetic data. Residues between the maps a and b is illustrated on the map [1]. c: magnetic map with the correction of the line shift effects linked to soil tillage and the magnetic disturbance of the residential area. Residues between the maps b and c is represented on the map [2]. d: magnetic map with the correction of the relative height variation of the sensors. Residues between the maps c and d is shown on the map [3].



AP-Figure 10 : Final magnetic map with the reduction to the pole of the site of Le Pontet. The enclosures and the main archaeological structures (ditches, pits and crab's pincers) are identified by letters. The magnetic map is georeferenced and placed above digital orthophotography (BD ORTHO® 2006 – IGN).

The excavation allows us to study the fill of the four pits in order to understand the magnetic signal origin. Magnetic susceptibility measurements *in situ* will complement the understanding of the magnetic map. The excavation will also compare the location and the dimensions of the pits in relation to the magnetic map to quantify positional errors.

In this study, the coupling between a high sensitive magnetometer and a motorized total station gives a high accuracy of the magnetic and positional measurements. Thus, the data processing chain permit a high quality magnetic map.

The Neolithic site of Le Pontet has served as a test zone for the original magnetic survey protocol with high spatial resolution and high precision. The site is established on the valley side composed of limestone substratum. Thus, this site has particular magnetic properties whose sources are anthropogenic (causewayed enclosure, pit) and natural (soil nature). So, the future works will use this

magnetic survey protocol on different archaeological structures (stone wall for example), different archaeological periods and in other geographical and geological contexts.

ACKNOWLEDGMENTS

We wish to thank the owners which gave us free access to their plots. We wish also to thank Victor Legrand, trainee at the University of La Rochelle, for his commitment during the survey. This artwork has been financed by the collective research program “Dynamics of occupation and exploitation of salt in the *charentais* gulfs, from the Neolithic to the Iron Age” whose the credits came from the Ministry of Cultural Affairs. We thank the reviewers and Dr Chris Gaffney for their constructive comments and their contributions to improve this paper.

REFERENCES

- Ard V, Mathé V, Lévêque F, Camus A. 2015. A comprehensive magnetic survey of a Neolithic causewayed enclosure in west-central France for the interpretation of archaeological features. *Archaeological Prospection* **22** (1): 21–32. DOI: 10.1002/arp.1495
- Baranov V, Naudy H. 1964. Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. *Geophysics* **29** (1): 67–79.
- Becker H. 2001. Duo- and quadro-sensor configuration for high speed/high resolution magnetic prospecting with caesium magnetometer. In *Magnetic prospecting in archaeological sites*. ICOMOS: Paris, France; 20–25.
- Blakely RJ. 1995. *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge University Press: Cambridge; New York.
- Böniger U, Tronicke J. 2010. Integrated data analysis at an archaeological site: A case study using 3D GPR, magnetic, and high-resolution topographic data. *Geophysics* **75** (4): 169–176. DOI: 10.1190/1.3460432
- Bourgueil B, Moreau P, Gabet C, L’Homer A, Vouve J. 1972. *Carte géologique de la France à 1/50 000, Rochefort XIV-30*. Notice explicative.
- Bruniaux G, Lévêque F, Mathé V, Camus A, Romey C, Ard V. 2015. High spatial resolution magnetic survey on the Neolithic site of Le Pontet (Charente-Maritime, France): presentation of the method and associated processing. In *Proceedings of the 1st international conference on metrology for archaeology*, Benevento, Italy: 550–555, October 2015.
- Ciminale M, Loddo M. 2001. Aspects of magnetic data processing. *Archaeological Prospection* **8** (4): 239–246. DOI: 10.1002/arp.172
- Eder-Hinterleitner A, Neubauer W, Melichar P. 1996. Restoring Magnetic Anomalies. *Archaeological Prospection* **3** (4): 185–197. DOI: 10.1002/(SICI)1099-0763(199612)3:4<185::AID-ARP56>3.0.CO;2-X
- Gaffney C, Gaffney V, Cuttler R, Yorston R. 2008. Initial results using GPS navigation with the Foerster magnetometer system at the World Heritage site of Cyrene, Libya. *Archaeological Prospection* **15** (2): 151–156. DOI: 10.1002/arp.330
- Gallo D, Ciminale M, Becker H, Masini N. 2009. Remote sensing techniques for reconstructing a vast Neolithic settlement in Southern Italy. *Journal of Archaeological Science* **36** (3-4): 43–50. DOI: 10.1016/j.jas.2008.07.002

- Haas AG, Viallix JR. 1976. Krigage applied to geophysics. The answer to the problem of estimates and contouring. *Geophysical Prospecting* **24** (1): 49–69. DOI: 10.1111/j.1365-2478.1976.tb00384.x
- Hao H, Qiang L, Jun W, Jianjie C, Xiang Y. 2012. Kriging-based study on the visualization of magnetic method data. In *2012 International Conference on Image Analysis and Signal Processing (IASP)*, Hangzhou, China: 1–6, November 2012.
- IGN, SHOM. 2015. *Litto3D®*, version 1.0. Description du contenu.
- Krige DG. 1951. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the chemical metallurgical and mining society of South Africa* **52** (6): 119–39. DOI: 10.2307/3006914
- Lehmann F, Green AG. 1999. Semiautomated georadar data acquisition in three dimensions. *Geophysics* **64** (3): 719–731. DOI: 10.1190/1.1444581
- Lévêque F, Mathé V. 2015. Prospection magnétique 3D à haute résolution, Du site à l'objet. In *Méthodes et formations en archéométrie en France, Méthodes et formations en archéométrie en France*. Errance: Charenton-le-Pont, France; 19–23.
- Maher BA. 1998. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **137** (1-2): 25–54.
- Mathé V, Ard V. 2016. *Dynamiques d'occupation et d'exploitation du sel dans les golfes charentais, du Néolithique à l'Âge du Fer. Rapport 2016*. Projet Collectif de Recherche. DRAC-SRA Poitou-Charentes.
- Mathé V, Lévêque F. 2003. High resolution magnetic survey for soil monitoring: detection of drainage and soil tillage effects. *Earth and Planetary Science Letters* **212** (1-2): 241–251. DOI: 10.1016/S0012-821X(03)00241-3
- Mathé V, Lévêque F, Mathé P-E, Chevallier C, Pons Y. 2006. Soil anomaly mapping using a caesium magnetometer: Limits in the low magnetic amplitude case. *Journal of Applied Geophysics* **58** (3): 202–217. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2005.06.004
- Smith WHF, Wessel P. 1990. Gridding with continuous curvature splines in tension. *Geophysics* **55** (3): 293–305. DOI: 10.1190/1.1442837
- Thompson R, Oldfield F. 1986. *Environmental Magnetism*. Springer Netherlands: Dordrecht. DOI: 10.1007/978-94-011-8036-8
- Trimble. 2015. *Station totale Trimble S8*. Fiche technique.

1.2 COMPLÉMENTS SUR LA CHAÎNE DE TRAITEMENT DU PROTOCOLE DE PROSPECTION MAGNÉTIQUE

1.2.1 La synchronisation

Chaque appareil ayant sa propre horloge, la synchronisation consiste à mettre en phase le temps enregistré par le magnétomètre avec celui enregistré par la station totale. Pour ce faire, une boussole (c'est-à-dire un aimant) est installée loin de toutes pollutions magnétiques d'origine anthropique. La station totale enregistre la position du réflecteur situé entre les deux capteurs du magnétomètre, placés l'un à côté de l'autre, à l'horizontal. Ce dernier enregistre le champ magnétique total. L'opérateur, harnaché avec le magnétomètre, se positionne de telle manière que les capteurs soient dans le plan équatorial du champ magnétique de la boussole, comme illustré schématiquement sur la Figure 1.2a. L'opérateur effectue des mouvements d'aller et retour en direction de la boussole. La station enregistre ce mouvement qui correspond à un « pic » pour l'une des composantes de positions (X ou Y). Simultanément, un « pic » étroit et de forte amplitude est enregistré par le magnétomètre. Ce signal provient de la variation de distance entre les capteurs et la boussole (Figure 1.2b). Plusieurs allers-retours sont effectués pour acquérir une succession de « pics » (Lévêque et Mathé, 2015).

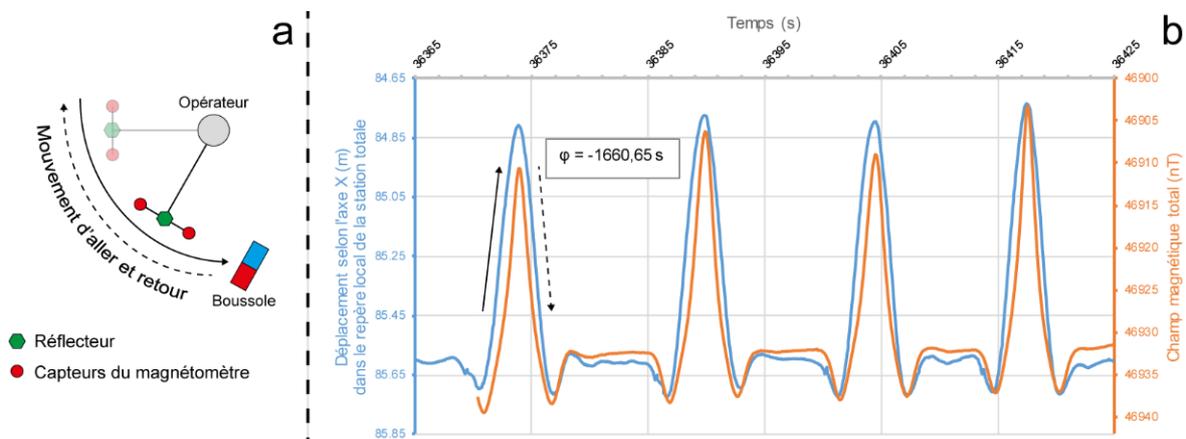


Figure 1.2 : (a) Schéma du déroulement de la phase de synchronisation. (b) Enregistrement de la position du réflecteur et du champ magnétique total par la station totale et le magnétomètre durant la phase de synchronisation. L'écart de temps entre les deux appareils est appelé φ .

L'écart de temps φ entre les horloges est déterminé en corrélant les « pics » enregistrés par les deux instruments. La corrélation temporelle est établie en mettant en phase les zones de fort gradient de déplacement avec celles de fort gradient d'intensité magnétique (présentes à proximité des maximums locaux). Le déphasage entre les deux horloges est estimé avec une précision de l'ordre de la milliseconde.

1.2.2 La zone critique de la station totale

La qualité de la carte magnétique résultante de la fusion des données magnétiques et de positionnement dépend de la précision des mesures de chaque instrument (station totale et magnétomètre) et de la qualité du *suivi (tracking)* du réflecteur par la station totale. La position d'une mesure magnétique est linéairement interpolée entre deux positions du réflecteur via les temps propres des deux jeux de données. La distance séparant les deux positions utilisées pour localiser une mesure magnétique est un critère de qualité. Ce paramètre dépend directement de la qualité du suivi de la station totale. La représentation de ce critère est possible soit par une carte de dispersion (*scatter plot*) des inter-distances entre chaque position ou soit sous la forme d'une carte de densité d'enregistrement de positions du réflecteur par mètre carré. Cette dernière est déterminée en comptant le nombre d'occurrence selon une maille de 1x1 m. La station totale enregistre environ 20 mesures par seconde. Avec une vitesse moyenne de l'opérateur variant entre 1 et 1,5 m/s et suivant l'orientation des passages (*tracks*) par rapport à la maille, la densité varie entre 15 et 40 mesures/m² pour un espacement inter-passages de 0,78 m. Sur la Figure 1.3, pour chaque zone de prospection (A, B, C, D et E ; cf. Figure 1.1), une carte de densité de mesure (position du réflecteur) a été tracée. La position de la station totale est indiquée et la progression de la prospection est effectuée en se rapprochant de la station totale.

L'examen des cartes de la Figure 1.3 montre que la densité de mesures n'est pas homogène. Une zone de bonne qualité est considérée avec une densité minimale de 15 points/m² et une de mauvaise qualité quand la densité est inférieure. Ces cartes illustrent une zone de qualité médiocre correspondant à une portion de secteur de disque comprise entre 40 et 70 m de la station totale. Cette surface est nommée : zone critique. À une distance inférieure, la densité est de nouveau correcte. Cette zone critique se retrouve sur l'ensemble des zones de prospection. Pour les prospections magnétiques futures, il est donc nécessaire de tenir compte de cette particularité. Ainsi, la station totale doit être à une distance minimale de 70 m des derniers profils de la prospection.

La qualification de zone médiocre ou de mauvaise qualité doit être nuancée. En effet, ceci ne signifie pas que la carte magnétique sur ces zones est incorrecte. Une faible densité de mesures implique que la position calculée d'une mesure magnétique possèdera une erreur plus importante. Sur la Figure 1.4, trois graphiques distance-temps entre deux positions successives sont représentées pour trois opérateurs. Le coefficient directeur de la courbe de tendance correspond à la vitesse moyenne de l'opérateur. La dispersion des points autour de la courbe de tendance s'accroît quand la distance et le temps entre deux positions augmentent. Ceci indique que la vitesse moyenne de l'opérateur est stable sur de petite distance mais ne l'est pas à plus grande distance (supérieure à 0,5 m). Cette dispersion dépend aussi de l'opérateur : l'opérateur 2 possède une dispersion beaucoup plus étroite que l'opérateur 1. De ce fait, comme la vitesse n'est pas constante à plus grande distance, l'erreur sur la position calculée d'une mesure magnétique croît avec l'augmentation de l'inter-distance entre deux positions du réflecteur : l'interpolation de la position d'une mesure magnétique suppose une vitesse

constante. Ainsi, cette erreur sera théoriquement plus importante pour les opérateurs ayant une plus forte variabilité de leur vitesse de marche (plus forte dispersion des points).

Cependant, l'histogramme des inter-distances entre deux positions (tous opérateurs confondus) montre que l'interpolation de la position d'une mesure magnétique se fait en grande majorité sur des inter-distances inférieures à 0,1 m (Figure 1.4). Un quart des mesures magnétiques est positionné avec une inter-distance comprise entre 0,1 et 0,2 m. De ce fait, l'interpolation des positions des mesures magnétiques avec des inter-distances supérieures à 0,5 m est relativement réduite. Néanmoins, la zone critique de la station totale doit impérativement ne pas être dans l'emprise de la prospection magnétique (Figure 1.3). Ceci permettra d'obtenir une carte magnétique avec une meilleure précision de positionnement afin de tirer le meilleur profit de ce nouveau protocole.

Les différentes cartes de densité de mesure par zones de prospection (Figure 1.3) sont couplées à la carte des anomalies magnétiques (réduite aux pôles) sur la Figure 1.5. Ceci permet d'identifier les parties de la carte avec une bonne précision de positionnement des mesures magnétiques. Les cartes de densité ont été lissées par une médiane glissante (fenêtre de 3x3 pixels) pour s'affranchir des petites variations. Cette carte montre que les zones avec une densité optimale, supérieure à 15 points/m², ne recouvrent que 40 % du site. Celles avec une densité supérieure à 5 points/m² correspondent à plus 70 % de la surface prospectée. L'objectif des prochaines prospections magnétiques avec ce protocole sera d'obtenir une densité de mesure optimale entre 70 à 90 % de la surface prospectée. Néanmoins, la topographie du site influence aussi la qualité du suivi de la station. C'est le cas au niveau du relief de la paléo-falaise où la densité de mesure est plutôt faible (même si une partie est dans la zone critique ; Figure 1.3 et 1.5).

Sur les zones de prospection C et E, de nombreux points noirs sont présents et correspondent à de fortes densités de mesures (Figure 1.3 ; encadrés rouges). Ce sont des arrêts de l'opérateur durant la prospection. Ces arrêts sont liés aux passages de véhicules sur la route départementale. Sur les deux zones C et E, plus de 110 arrêts sont référencés. Si chaque profil avait dû être refait à chaque passage de véhicule, comme selon un protocole standard de prospection magnétique, cela équivaldrait à refaire les deux tiers de la zone de prospection A. L'arrêt de l'opérateur lorsqu'un véhicule passe permet de repérer l'anomalie correspondante pour la traiter ultérieurement. Ceci réduit considérablement le temps d'acquisition sur le terrain.

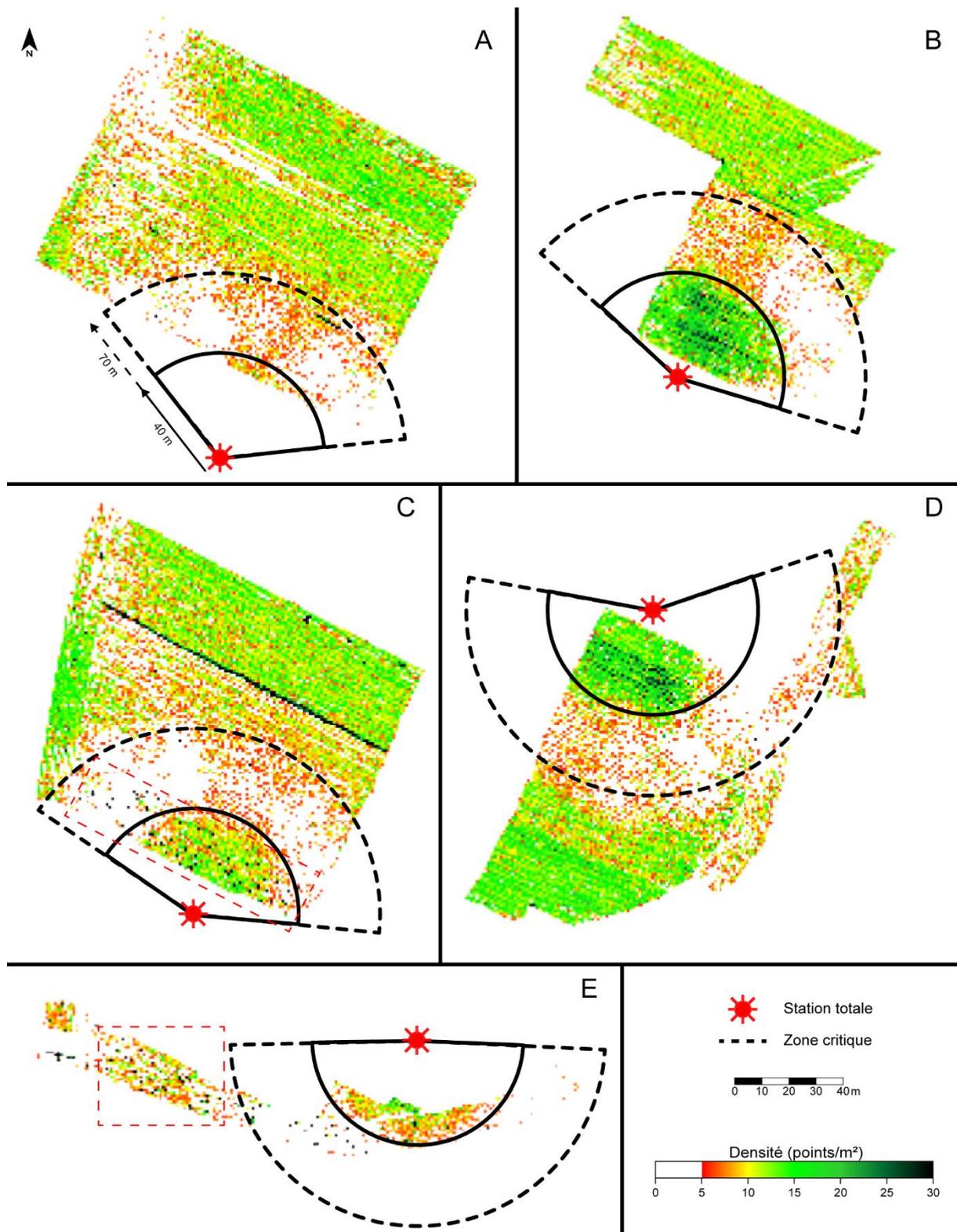


Figure 1.3 : Cartes des densités de mesures (points/m²) des positions du réflecteur enregistrées par la station totale. Les densités ont été calculées pour chaque zone de prospection A, B, C, D et E selon une maille carrée de 1x1 m. Les rectangles pointillés rouges correspondent à des zones marquées par des arrêts de l'opérateur (points noirs) liés aux passages de voitures.

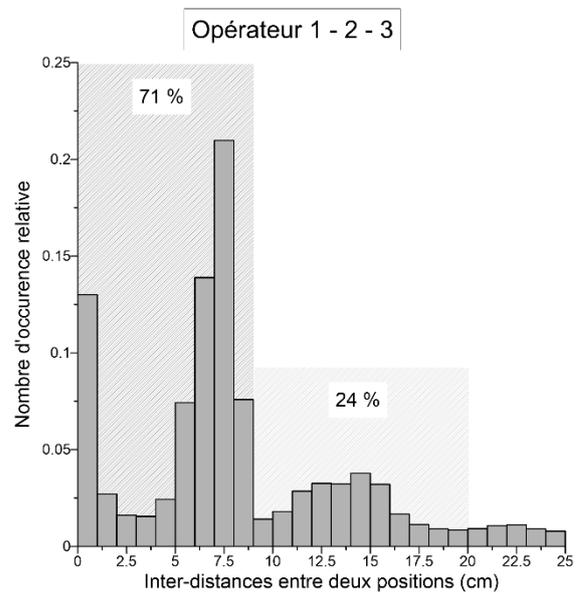
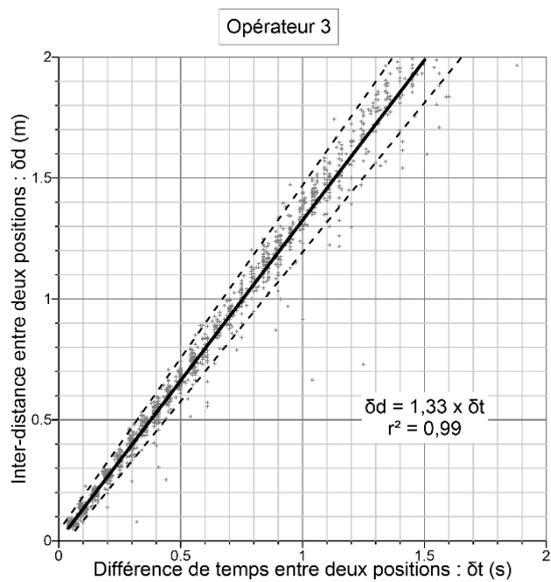
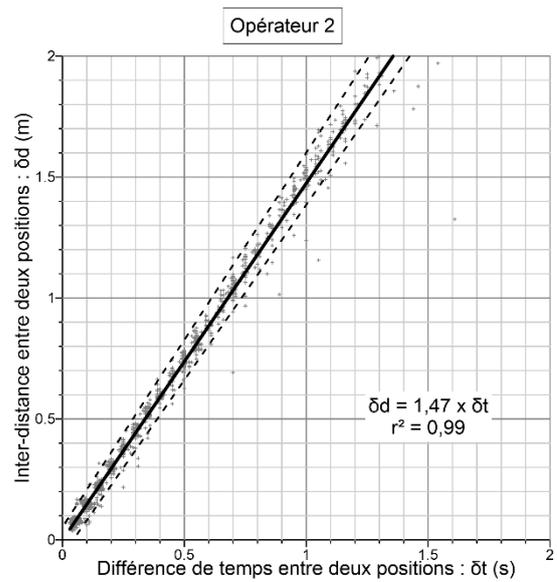
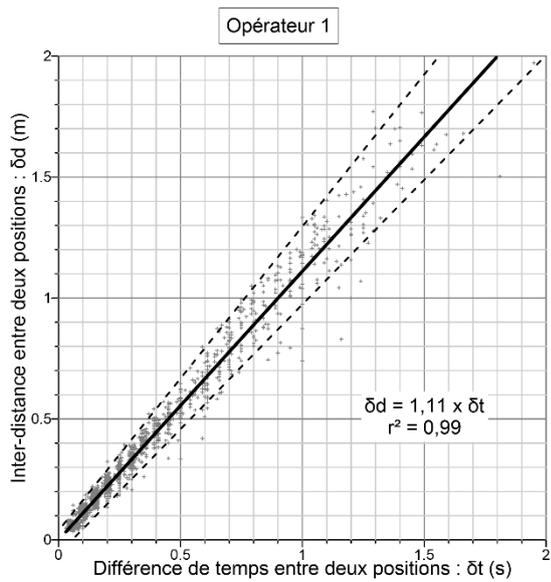


Figure 1.4 : Relations graphiques pour chaque opérateur de la zone de prospection A des inter-distances entre deux positions successives enregistrées par la station totale avec la différence de temps entre ces deux positions. Histogramme des inter-distances entre deux positions successives utilisées pour l'interpolation des positions des mesures magnétiques pour les trois opérateurs.

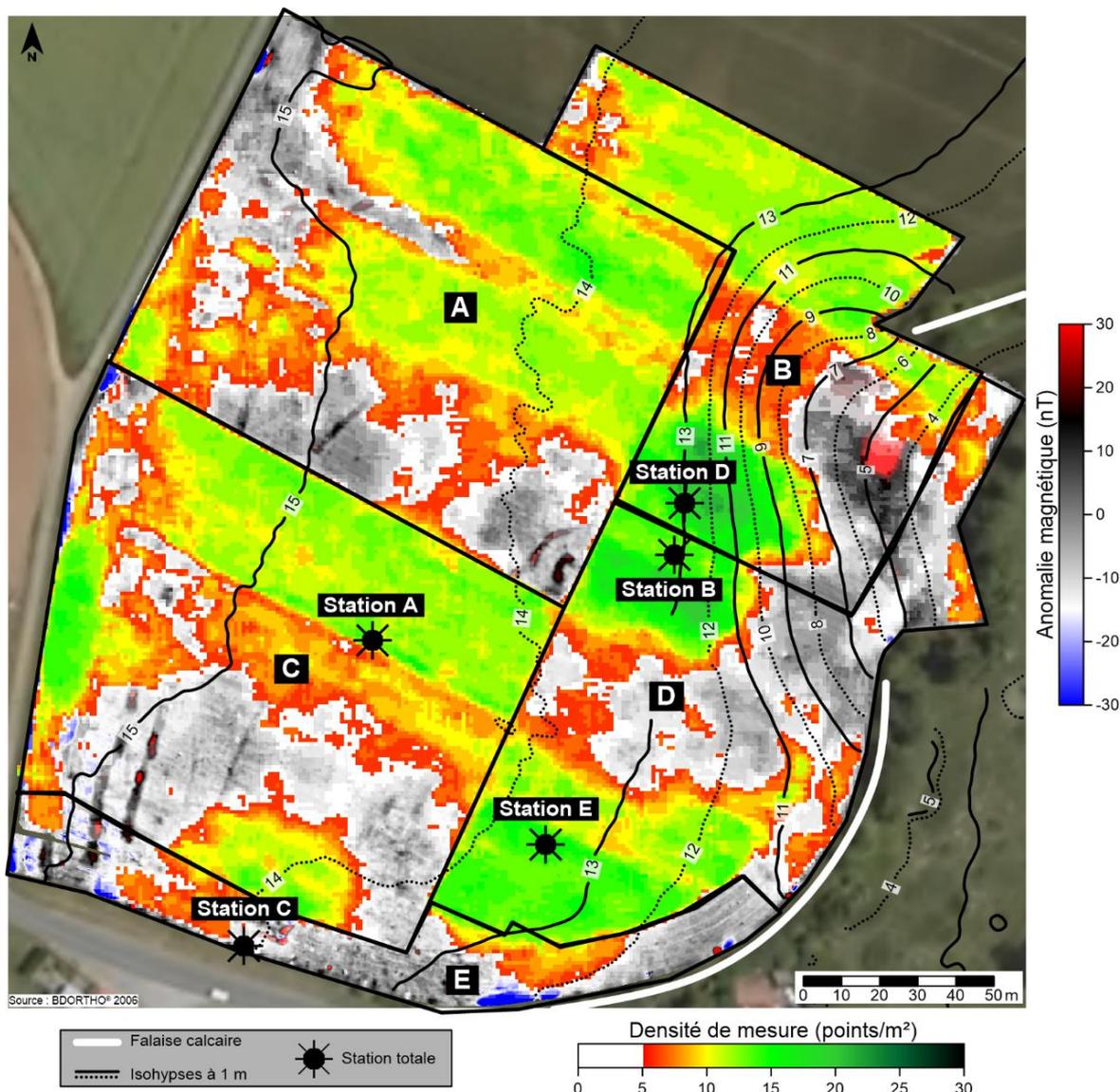


Figure 1.5 : Carte de la densité de mesure de la station totale lissée par une médiane glissante sur fond de la carte magnétique du Pontet réduite au pôle.

1.3 INTERPRÉTATION ET EXTENSION DE LA CARTE MAGNÉTIQUE DU PONTET

1.3.1 Anomalies magnétiques assimilées à des structures néolithiques

Les différentes étapes du traitement des données magnétiques améliorent la « lisibilité » de la carte magnétique. Elle est présentée en couleurs sur la Figure 1.6a, sans annotation, ainsi que la même version avec annotations (Figure 1.6b). Les anomalies de moyenne à forte intensité (supérieures à 5 nT) et de forme allongée correspondent aux fossés composant les deux enceintes néolithiques E1 et E2. La dénomination d'enceinte néolithique à la troisième (E3) reste incertaine. L'enceinte externe (E1) et médiane (E2) sont respectivement composées de quatre et deux fossés discontinus et subparallèles. Elles possèdent au minimum dix entrées, marquées par des interruptions des fossés (I1, I2, I3, I5, I7, I8, I9, I10) ou par la présence de pinces de crabe (I4 et I6), architecture typique du Centre-Ouest (Burnez et

Louboutin, 1999). Ces deux enceintes se rabattent sur une paléo-falaise caractérisée par une anomalie magnétique négative orientée N-S (suit environ l'isohypse 11 m). La forme coudée des fossés au nord marque un changement de direction générale de l'enceinte externe (E1) vers cette paléo-falaise, témoignant d'une utilisation du relief comme protection naturelle. La troisième enceinte est composée d'un unique fossé.

Sur l'enceinte externe, l'intensité du signal magnétique est plus forte sur les fossés internes (entre 15 et 20 nT) et ceux près de l'entrée principale (I4) que sur les fossés externes (entre 10 et 15 nT). Comme démontré sur l'étude interdisciplinaire du site de Bellevue (Chenommet, Charente), cette variation est liée à une différence de comblement des fossés. Les fossés internes servent de « décharges » et sont généralement comblés par des tessons, des matériaux brûlés et avec un apport en matière organique plus important (restes des activités anthropiques liées au site). Au cours du temps et par l'action de la pédogénèse, ces fossés acquièrent un signal magnétique relativement fort (Poissonnier, 2014 ; Ard et *al.*, 2015a).

Les quatre anomalies magnétiques, de forme circulaire de 3 à 4 m de diamètre et de moyenne intensité, localisées à l'intérieur de l'enceinte médiane (E2) ont été interprétées, dans un premier temps, comme de probables fosses néolithiques (Figure 1.6b, zone K). Par conséquent, elles avaient un intérêt particulier dans le cadre du programme collectif de recherche (PCR) sur les « Dynamiques d'occupation et d'exploitation du sel dans les golfes charentais, du Néolithique à l'Âge du Fer ». Ces anomalies rappelaient les fosses découvertes à l'intérieur des enceintes néolithiques peu-richardiennes (Néolithique récent II) de la Garenne à Saint-Hippolyte ; à 7 km à l'est de Rochefort (Burgaud, 1937 ; Gabet et Massaud, 1965) ; et de la Sauzaie à Soubise (Pautreau, 1976). Assimilées auparavant à des *fonds de cabane* néolithiques, elles sont aujourd'hui réinterprétées comme de possibles structures de chauffe liées à l'exploitation du sel (Ard et Weller, 2014). Les prospections géophysiques complémentaires effectuées sur cette zone et les résultats sommaires de la fouille sont discutés dans la seconde partie.

La carte magnétique du site montre une dernière structure remarquable, notée L (Figure 1.6b). Elle est composée de six anomalies magnétiques ponctuelles avec un diamètre moyen de 1 m et de faible intensité (de 1 à 5 nT). La répartition spatiale de ces anomalies est intéressante car cinq d'entre-elles sont réparties sur un arc de cercle centré sur la sixième. Cet arc est orienté vers la vallée comblé par des alluvions fines fluvio-marines. Ces anomalies pourraient correspondre à une série de trous de poteau supportant une structure associée à des activités halieutiques ou portuaires, contemporaines ou postérieures au site néolithique. Des investigations supplémentaires devront être réalisées pour comprendre cette structure et sa fonction.

La grande entrée I4 de l'enceinte externe (E1) présente des anomalies magnétiques intéressantes pouvant correspondre à des structures archéologiques, comme par exemple l'anomalie G (Figure 1.6b).

Un agrandissement sur cette entrée est illustré sur la Figure 1.7. Cette entrée principale (I4) est composée de quatre fossés (F1, F2, F3 et F4) complétés, localement, par un cinquième (F3b). Ce dernier est de plus faible intensité magnétique que les quatre autres et d'extension plus limitée. Il pourrait s'agir du reliquat d'un fossé néolithique abandonné lors de l'élaboration de l'entrée principale. Cette entrée est composée aussi d'un ensemble de chicanes qui viennent en complément des deux pinces de crabe (P1 et P2). La pince de crabe P2 est renforcée par un petit fossé courbé et non relié au fossé externe (F1).

L'intérieur de l'entrée I4 est caractérisé par trois groupes d'anomalies particulières (H1, H2 et H3) se raccordant aux fossés de l'enceinte externe (Figure 1.7). Les deux premiers (H1 et H2) sont composés de deux rangées parallèles d'anomalies magnétiques ponctuelles, de dimension comprise entre 0,5 et 1 m de diamètre et d'intensité magnétique variable, alignées en travers de l'axe de l'entrée. Le troisième (H3) est caractérisé par une anomalie linéaire associée à quelques anomalies ponctuelles. Ces trois groupes semblent correspondre, par leur morphologie, à des tranchées de palissade raccordées aux fossés. Elles se rapprochent des structures identifiées sur le site néolithique de Bellevue à Chenommet (Ard et *al.*, 2015a).

La structure G possède une forme globalement rectangulaire, orientée quasi N-S, avec une longueur et une largeur respectivement de 30 et 10 m (Figure 1.7). Elle semble contemporaine du site car les fossés de l'enceinte épousent sa morphologie. Ces bords sont composés par des anomalies magnétiques linéaires de faible intensité et de même orientation que les diaclases (G₁ et G₂). L'anomalie G₃ est de plus forte intensité que les deux précédentes. Elle possède une forme courbe dans la continuité de G₁ et recoupe le fossé 4. Deux anomalies ponctuelles (G₄) sont identifiées au nord (trous de poteau ?). Cette structure G est complexe à interpréter mais, de par ses dimensions et sa morphologie, elle pourrait correspondre aux vestiges d'un bâtiment. Des prospections supplémentaires ont été réalisées sur cette structure et décrites dans la section 2.2.4. Elles fournissent des informations complémentaires à la carte magnétique.

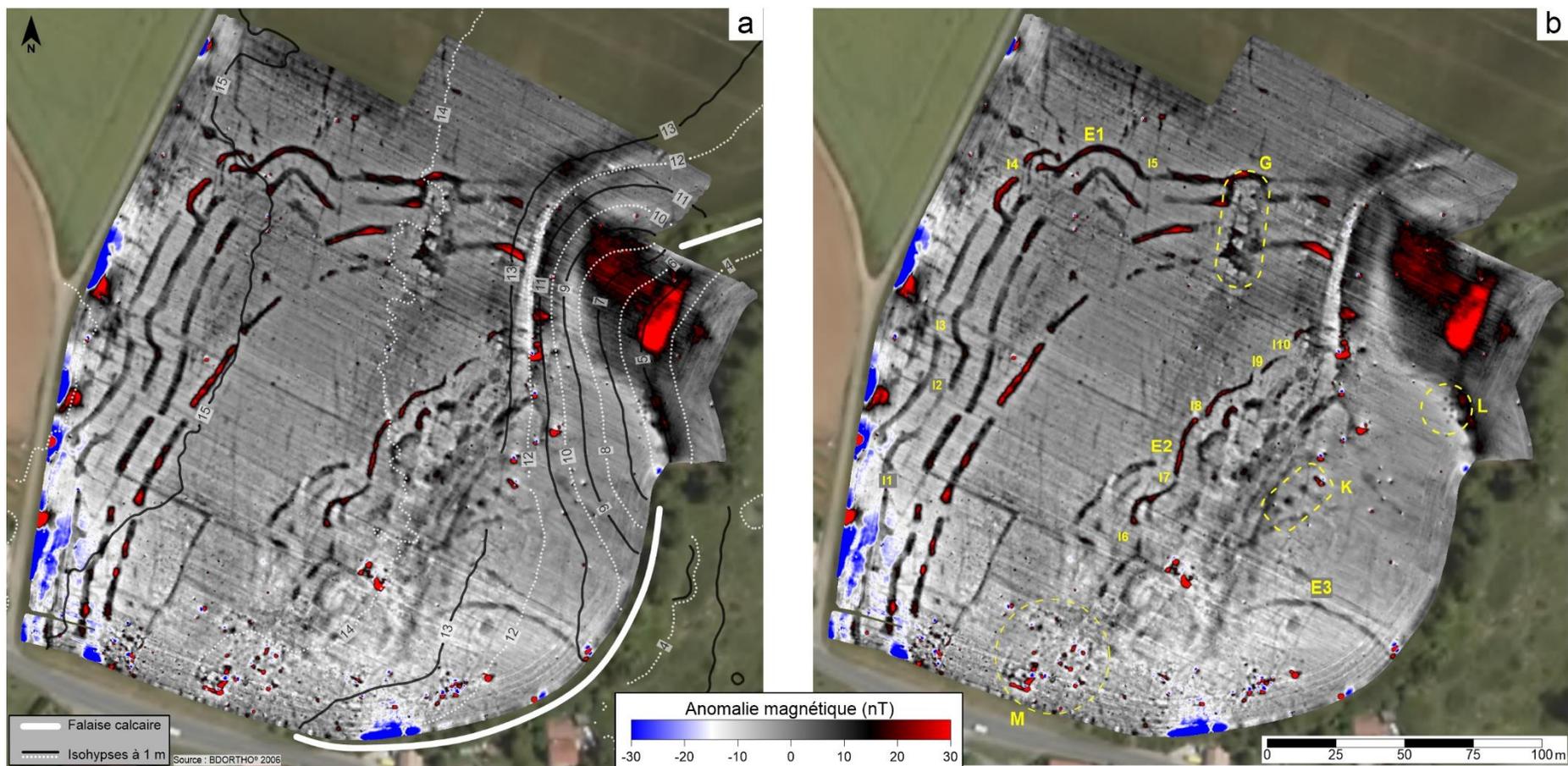


Figure 1.6 : (a) Carte des anomalies magnétiques réduites au pôle du site néolithique du Pontet. (b) Carte magnétique annotée.

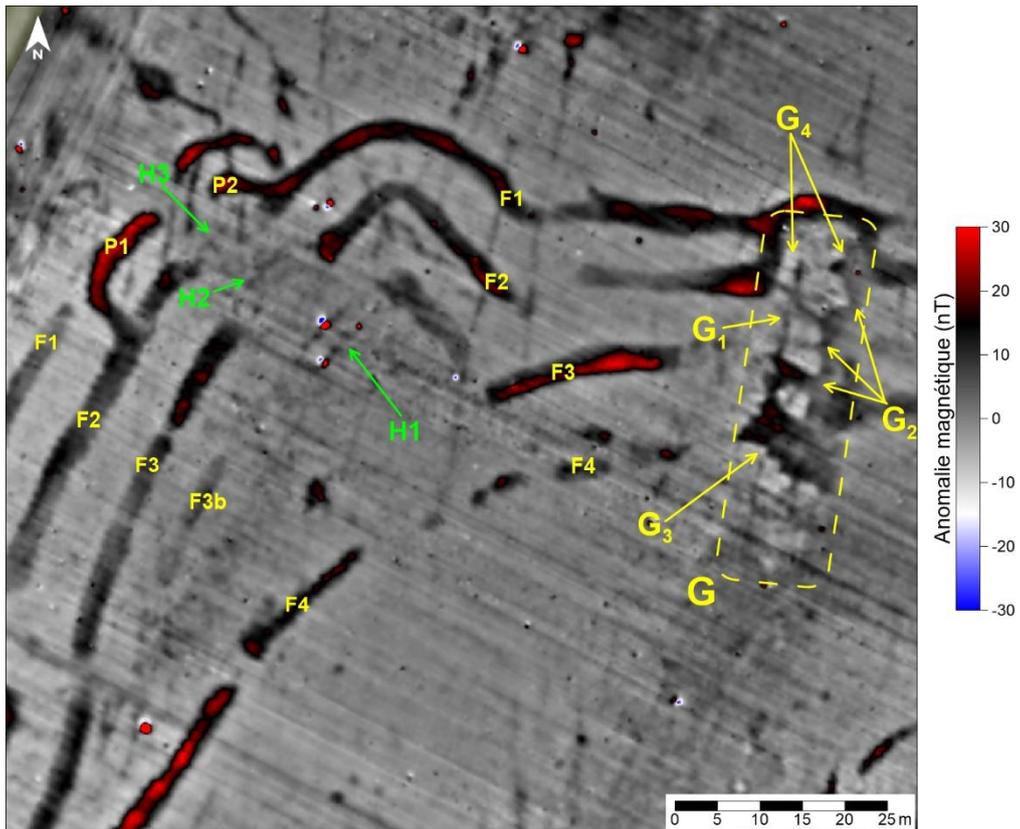


Figure 1.7 : Agrandissement de la carte magnétique réduite au pôle sur l'entrée principale (I4) de l'enceinte externe (E1) du site du Pontet.

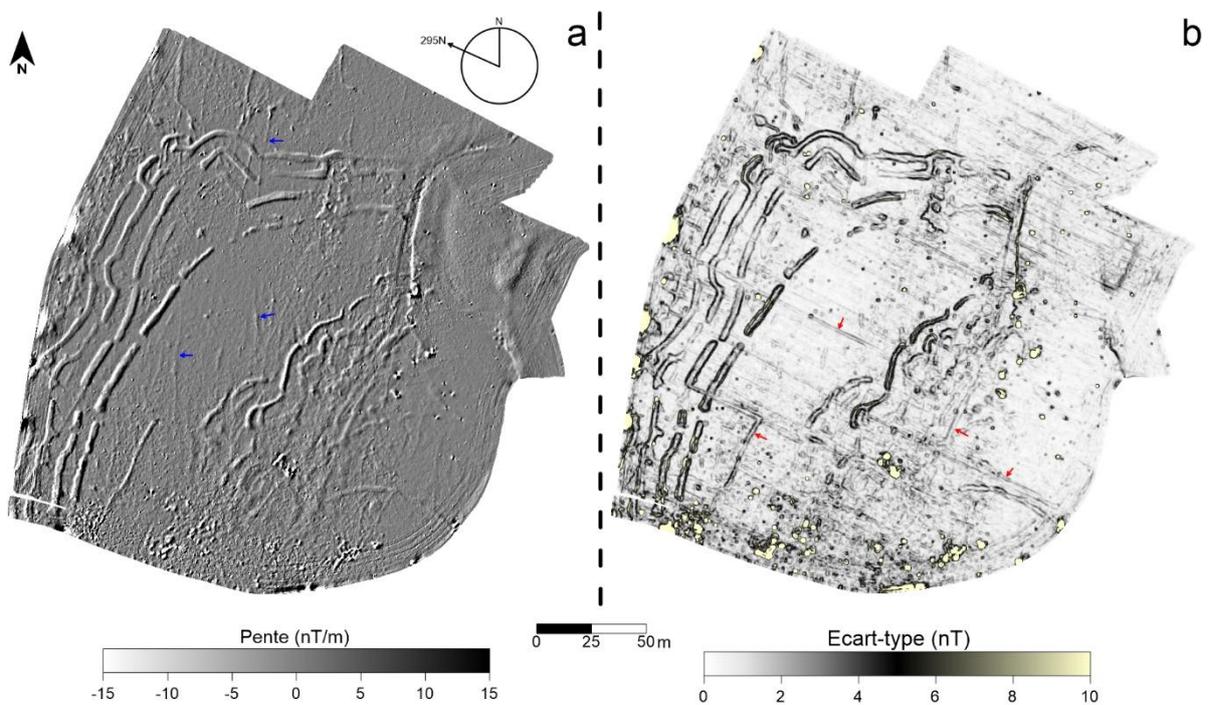


Figure 1.8 : Traitements de l'image sur la carte magnétique réduite au pôle. (a) Dérivée directionnelle orientée 295N, les flèches bleues montrent des exemples de diaclases. (b) Écart-type local selon une fenêtre glissante de 1 m, les flèches rouges montrent des exemples de parcellaire.

1.3.2 Anomalies magnétiques d'origine naturelle ou post-néolithique

Les anomalies magnétiques ne correspondant pas à des structures néolithiques font principalement références aux structures naturelles (comme les diaclases et la paléo-falaise) et anthropiques (comme le parcellaire). Pour identifier au mieux ces anomalies souvent linéaires et faire abstraction des effets de labour, deux traitements d'image ont été effectués :

- Une dérivée directionnelle orientée selon un angle de 295N (Figure 1.8a) ;
- Une carte de l'écart-type local (Figure 1.8b). L'écart-type est calculé sur une fenêtre glissante de 1 m.

1.3.2.1 La paléo-falaise et la partie basse

La paléo-falaise correspond à une anomalie négative orientée N-S qui suit environ l'isohypse 11 m NGF (Figure 1.6a). Elle est associée à une rupture de pente, visible par le resserrement des isohypses, formant un versant abrupt en direction du fond de vallée. La partie basse du site est caractérisée par une zone avec une forte intensité magnétique (> 20 nT). L'augmentation de l'intensité est probablement induite par un changement de la nature du sol liée au colluvionnement et à la lithologie (alluvions fines). Sur le plateau, le sol se développe sur un substrat calcaire qui est un matériau peu magnétique. La pédogénèse et l'action du feu génèrent des minéraux magnétiques néoformés aboutissant à un sol plus magnétique que le substrat calcaire (Le Borgne, 1960 ; Le Borgne, 1965 ; Fassbinder et *al.*, 1990 ; Maher, 1998). En bas de versant, le sol se développe sur des colluvions et des alluvions fines avec une concentration en minéraux magnétiques plus importantes (Mathé et Lévêque, 2005). Néanmoins, l'intensité magnétique est trop élevée pour être uniquement d'origine pédogénétique, surtout au niveau de la zone allongée où elle est supérieure à 30 nT. Pour une interprétation archéologique, la source du signal pourrait être associée à des amas de matériaux magnétiques, comme des tessons, enfouis sous le sédiment.

1.3.2.2 Les diaclases

La dérivée directionnelle met clairement en évidence les structures fossoyées des enceintes néolithiques en supprimant les effets de linéation liés au travail du sol (Figure 1.8a). Les anomalies linéaires possédant une direction préférentielle N-S (entre 10 et 50 m de long) sont interprétées comme des diaclases. L'ensemble des diaclases repérées est superposé à la carte magnétique sur la Figure 1.9.

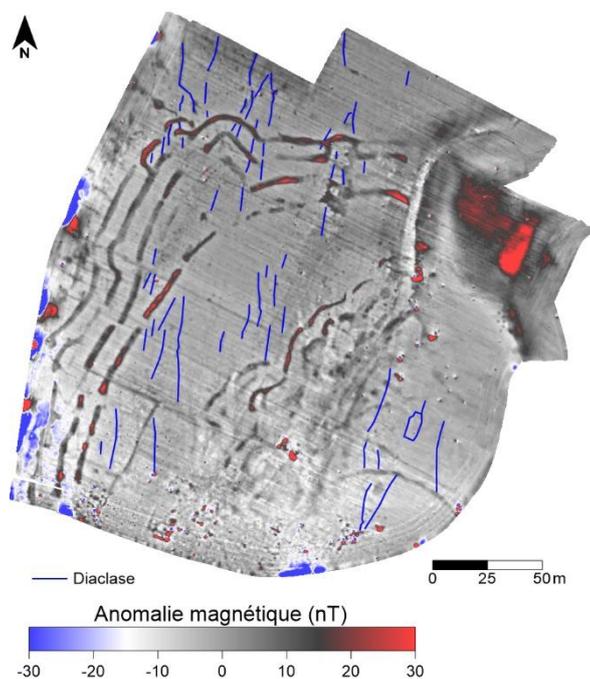


Figure 1.9 : Carte magnétique réduite au pôle avec la localisation des diaclases dans le substrat calcaire

La grande majorité des diaclases est orientée N-S. Elles sont principalement présentes au niveau de l'enceinte externe et dans la partie intérieure de l'enceinte médiane. Les diaclases sont des structures linéaires peu larges et d'intensité magnétique faible. Leurs répartitions spatiales portent une information intéressante sur l'épaisseur relative de sol développée sur le substrat calcaire. Même si l'enceinte médiane est une zone magnétiquement difficile à lire, l'absence de diaclases visibles indique, soit une épaisseur de sol plus importante, soit une nature lithologique différente.

1.3.2.3 Le parcellaire et les anciennes structures bâties

L'aide à l'identification des anomalies magnétiques liées à des parcellaires anciens est effectuée avec l'écart-type local (Figure 1.8b). La comparaison de cette carte avec la dérivée directionnelle et la carte magnétique (Figure 1.8 et 1.6) permet d'identifier plusieurs anomalies rectilignes se recoupant à angle droit et probablement associées à des parcellaires. Afin de valider ces anomalies en tant que tels, elles sont comparées aux cadastres anciens.

Les cadastres antérieurs au XX^{ème} siècle sont issus des Archives départementales de la Charente-Maritime : cadastre de 1824 (Saint-Nazaire-sur-Charente, section B8). Les parcellaires du XX^{ème} siècle sont identifiés sur les photographies aériennes anciennes (clichées de 1937, 1950, 1957, 1964, 1973) de l'IGN, disponibles sur le site du *Géoportail*. À la fin des années 1970, les limites parcellaires sont quasiment les mêmes qu'actuellement. Les limites cadastrales ont été vectorisées et géoréférencées dans un référentiel géographique. Les anomalies rectilignes identifiées sur la carte magnétique et sur l'écart-type local sont comparées avec ces différentes limites parcellaires à diverses périodes sur la Figure 1.10.

Sur le site, l'orientation préférentielle du cadastre et des parcellaires est NW-SE et NE-SW. Les différentes anomalies rectilignes identifiées possèdent une orientation similaire. Ces anomalies se superposent approximativement aux divers parcellaires des différentes périodes. De ce fait, même si certaines anomalies ne trouvent pas d'analogue sur les cadastres répertoriés, du fait de leur morphologie et leur orientation, elles correspondent à des limites de parcelles pouvant être plus anciennes. Néanmoins, l'erreur de position liée au référencement peut aussi induire des décalages, surtout pour la période napoléonienne.

Les photographies aériennes mettent aussi en évidence la présence de bâtiments de petites dimensions (surface moyenne de 25 m²) correspondant à des possibles cabanes de jardin (Figure 1.11). Ils ont été répertoriés sur la carte magnétique et ne semblent pas avoir perturbé les fossés néolithiques. Sur la carte d'état-major de la France de 1820-1866, disponible sur le site du *Géoportail* de l'IGN, la feuille de gravure de La Rochelle (datée de 1845) montre la présence d'un bâtiment en bordure du site. Il correspond probablement à une ancienne ferme. Malgré la faible précision de cette carte à l'échelle du site, la position relative de ce bâtiment est intéressante. En effet, il est localisé sur le groupe d'anomalies magnétiques ponctuelles de forte intensité M (Figure 1.6b). Au niveau de cette zone, sur la carte de l'écart-type local (Figure 1.8b), ces anomalies semblent présenter des géométries rectangulaires. Il est possible que cette structure M corresponde aux vestiges de cette ancienne ferme de 1845 (Figure 1.6b et 1.11).

1.3.3 Extension de la carte magnétique du Pontet vers le Nord

En utilisant le même protocole d'acquisition mais avec le magnétomètre GSMP-35G (*GEM Systems*), une extension de 0,3 ha au nord de l'entrée principale du site a été effectuée (Figure 1.12). L'objectif était de rechercher des structures néolithiques à l'extérieur de l'enceinte externe (E1). La prospection a été réalisée durant la même période de l'année (juin 2016) que pour la première acquisition (mai 2015). La culture étant la même, les profils de prospection correspondent au rang de maïs. La configuration des capteurs et leur écartement sont aussi les mêmes. La sensibilité et la fréquence d'acquisition du magnétomètre GSMP-35G sont différentes. Il fonctionne à une cadence de 20 Hz permettant d'obtenir 60 mesures/m², une densité deux fois supérieure à celle obtenue avec le magnétomètre G-858 (*Geometrics*).

L'extension de la carte magnétique complète la partie nord du site mais ne montre pas d'anomalie magnétique interprétable comme des structures néolithiques. La partie la plus à l'est de l'extension présente un signal magnétique plus intense comportant diverses structures. Leurs géométries semblent correspondre à des structures naturelles liées à des évolutions pédologiques localement différentes. Néanmoins, la surface d'observation est trop petite pour en tirer une information significative et l'interprétation de ces structures n'est pas aisée.

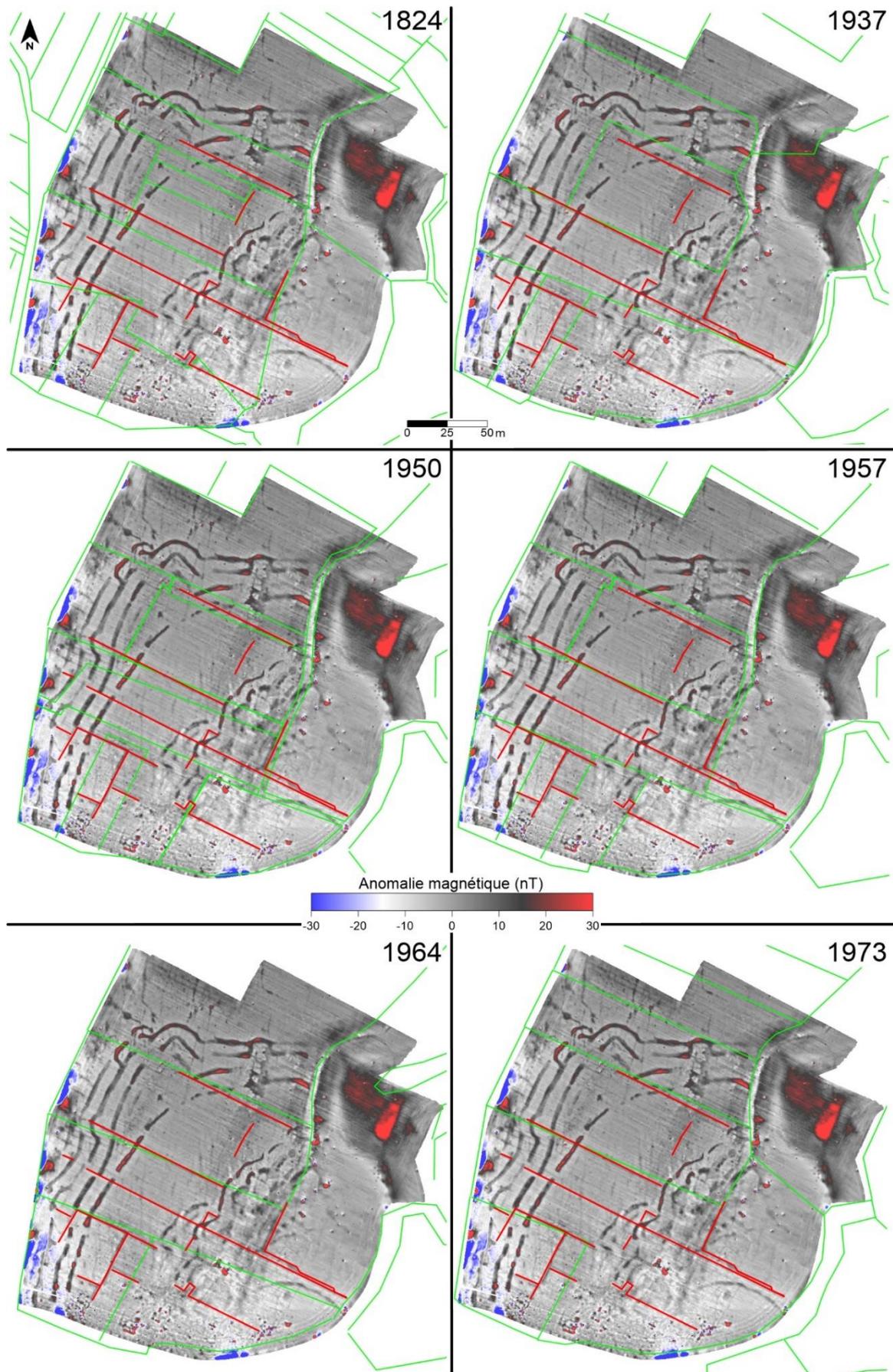


Figure 1.10 : Cartes magnétiques réduites au pôle superposées aux limites parcellaires (tracés verts) de différentes périodes historiques (sources : Archives départementales de la Charente-Maritime et Géoportail de l'IGN). Les anomalies rectilignes interprétées comme des parcellaires correspondent aux tracés rouges.

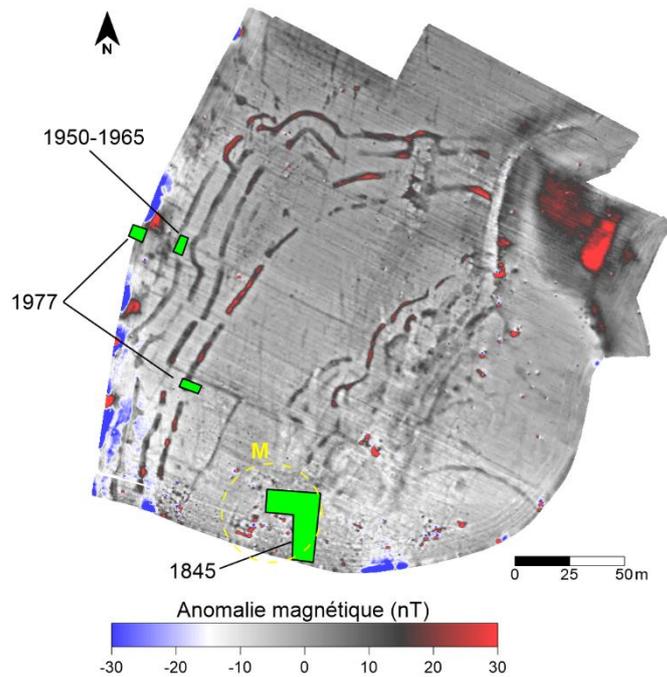


Figure 1.11 : Carte magnétique réduite au pôle avec la localisation de différents bâtiments à diverses époques. Sources : Géoportail de l'IGN.

1.3.4 Conclusions

La carte magnétique fournit une vision globale de l'organisation du site du Pontet. Les deux enceintes néolithiques (E1 et E2) sont clairement identifiables et leurs fossés présentent un signal magnétique très contrasté avec leur encaissant. L'utilisation des outils de traitement de l'image permet de discriminer les anomalies magnétiques non-associées à des structures archéologiques telles que les diaclases. Leur identification permet d'appréhender une variabilité relative de l'épaisseur de sol recouvrant le substrat, notion qui sera discutée dans la section 2.1. Le recoupement des informations fournies par la carte magnétique et ces versions traitées avec des sources historiques ont été exploités pour isoler les structures récentes (parcellaires et bâtiments) des structures néolithiques.

L'extension de la partie nord du site avec le protocole de prospection magnétique n'a pas fourni de résultat probant pour la recherche de structures néolithiques. Néanmoins, cela a permis de tester de nouveau le protocole et la carte résultante est de bonne qualité même si elle a été effectuée sur une petite surface.

Une seconde zone d'étude a été choisie pour tester ce protocole original de prospection magnétique : le site néolithique de la Garenne à Saint-Hippolyte. Il a été prospecté pour cartographier d'éventuelles structures fossoyées. La chaîne de traitement des données acquises sur ce site a été la même que celle utilisée pour traiter les données du Pontet.

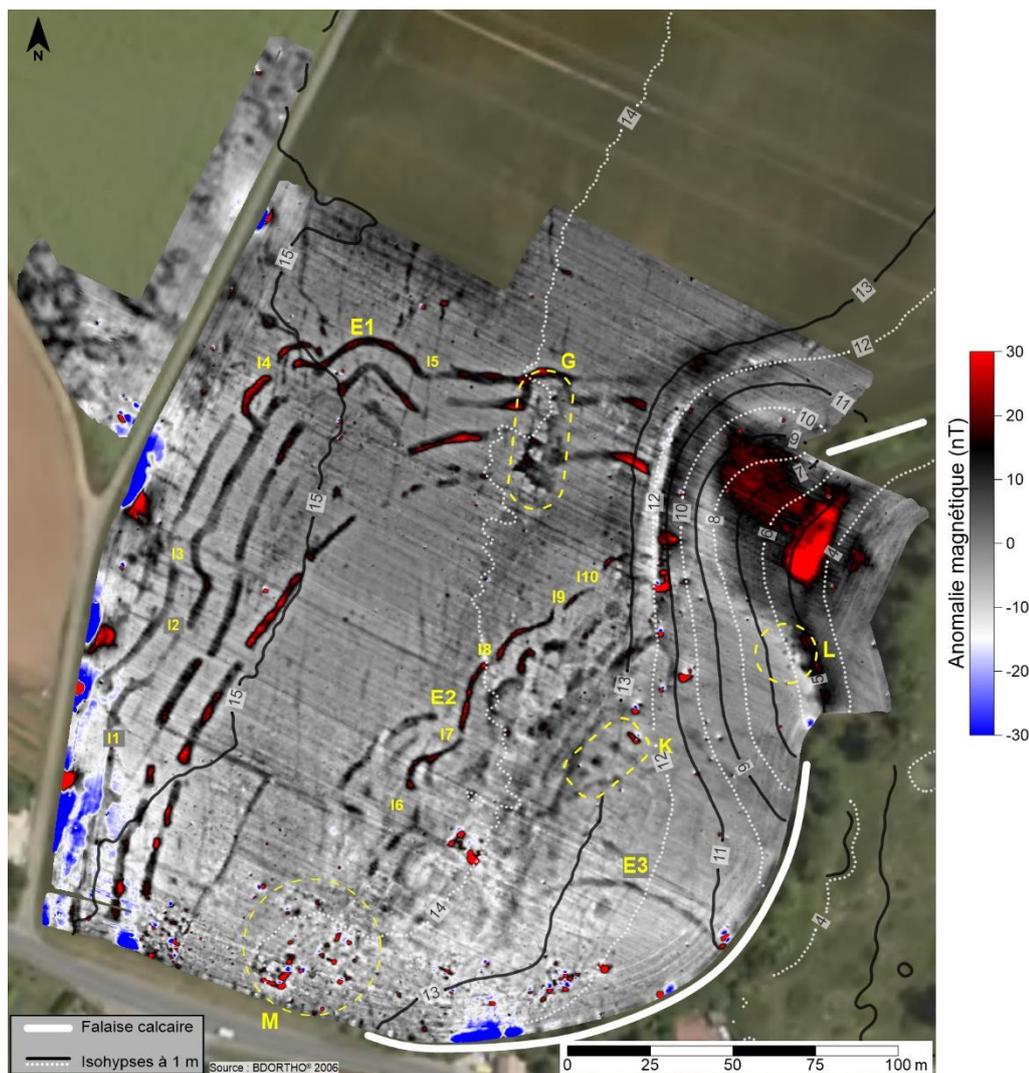


Figure 1.12 : Carte magnétique réduite au pôle et son extension vers le nord de l'entrée principale (14).

1.4 PROSPECTION MAGNÉTIQUE À HAUTE RÉOLUTION : SITE NÉOLITHIQUE DE LA GARENNE (SAINT-HIPPOLYTE, CHARENTE-MARITIME)

1.4.1 Présentation du site

Le site de la Garenne est connu depuis 1932 où une fouille a été entreprise en 1936, probablement sur le secteur de l'actuelle zone de stockage de la DDE (Figure 1.13a). Elle avait mis au jour une structure néolithique remarquable : un « fond de cabane » composé d'un foyer (Burgaud, 1937). Une fouille de sauvetage fût entreprise en 1963 à la suite de la construction de la zone de stockage de la DDE. L'opération fût gérée par la Société Géographique de Rochefort pour compléter les informations recueillies lors de la première fouille. L'analyse du mobilier permettait d'attribuer le site à la culture du Peu-Richard, Néolithique récent II (Gabet et Massaud, 1965). Actuellement les structures de « fond de cabane » sont réinterprétées comme de possibles structures de chauffe liées à l'exploitation du sel durant le Néolithique récent (Ard et Weller, 2014).

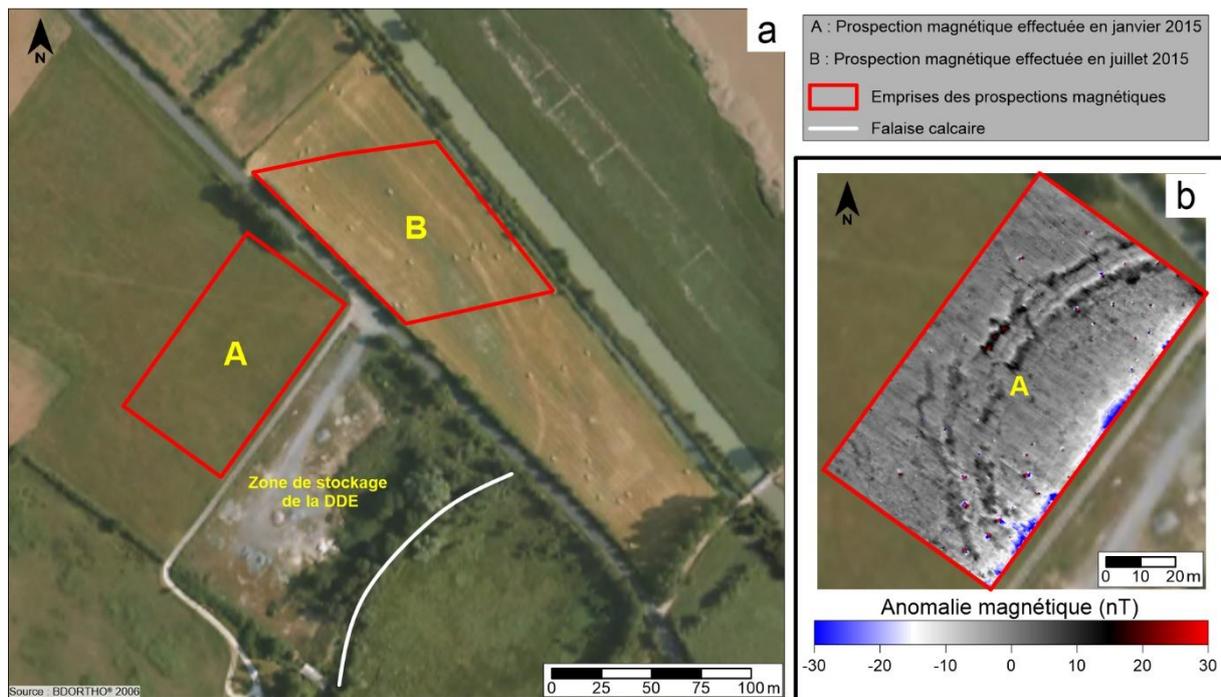


Figure 1.13 : (a) Orthophotographie du site de la Garenne et localisation des prospections magnétiques. (b) Résultat de la prospection magnétique de janvier 2015 avec un protocole standard d'acquisition.

1.4.2 Méthodes et comparaison de protocoles

Pour la zone A (Figure 1.13a), la mesure du champ magnétique total a été effectuée par le magnétomètre G-858 (*Geometrics*) composé de deux capteurs à vapeur de césium espacés horizontalement l'un de l'autre de 0,5 m. La cadence d'enregistrement est de 10 mesures par seconde. Les valeurs du champ magnétique total sont corrigées de la variation diurne du champ terrestre par un second magnétomètre disposé en base. La localisation des points de mesure est effectuée par la station totale (S8, *Trimble*) via le réflecteur fixé entre les deux capteurs. La fréquence moyenne d'échantillonnage de la station totale est de 20 mesures par seconde.

La parcelle de la zone A n'étant pas une culture de maïs, un carroyage a été installé. L'acquisition a été réalisée par des passages successifs tous les mètres avec des profils de mesures magnétiques espacés les uns des autres de 0,5 m. Deux acquisitions indépendantes ont été effectuées simultanément : une avec le protocole original de prospection magnétique (idem que celui du Pontet) et une autre selon un protocole standard. Ce dernier correspond à un enregistrement où le positionnement est effectué par le magnétomètre : les mesures magnétiques sont réparties de manière homogène le long du profil dont la longueur est prédéfinie avant de débiter l'acquisition. Il y a ainsi deux enregistrements de données magnétiques identiques mais acquis suivant deux protocoles de positionnement différent.

Pour la zone B, la mesure du champ magnétique total a été réalisée avec le magnétomètre GSMP-35G (*GEM Systems*) composé de deux capteurs à vapeur de potassium, dans la même configuration que celle décrite pour l'autre magnétomètre. Il enregistre à la cadence de 20 mesures par

seconde. Les valeurs de champ total mesurées sont corrigées de la variation diurne par un magnétomètre G-858 disposé en base. Comme la parcelle prospectée est une prairie, un carroyage a aussi été utilisé. L'acquisition correspondait à des passages successifs tous les mètres avec des profils de mesures magnétiques espacés les uns des autres de 0,5 m. La localisation des mesures magnétiques est uniquement effectuée par la station totale.

Les résultats de la prospection magnétique de la zone A selon le protocole standard sont illustrées sur la Figure 1.13b. Après un retrait de la médiane par profil, la correction des valeurs aberrantes et des effets de « zigzag » lié à l'acquisition, la carte magnétique résultante est de bonne qualité et très explicite. Elle montre la présence d'une enceinte fossoyée. Un extrait de la prospection sur la zone A est présenté sur la Figure 1.14 avec une comparaison entre l'acquisition par le protocole standard (carte A) et original (carte B).

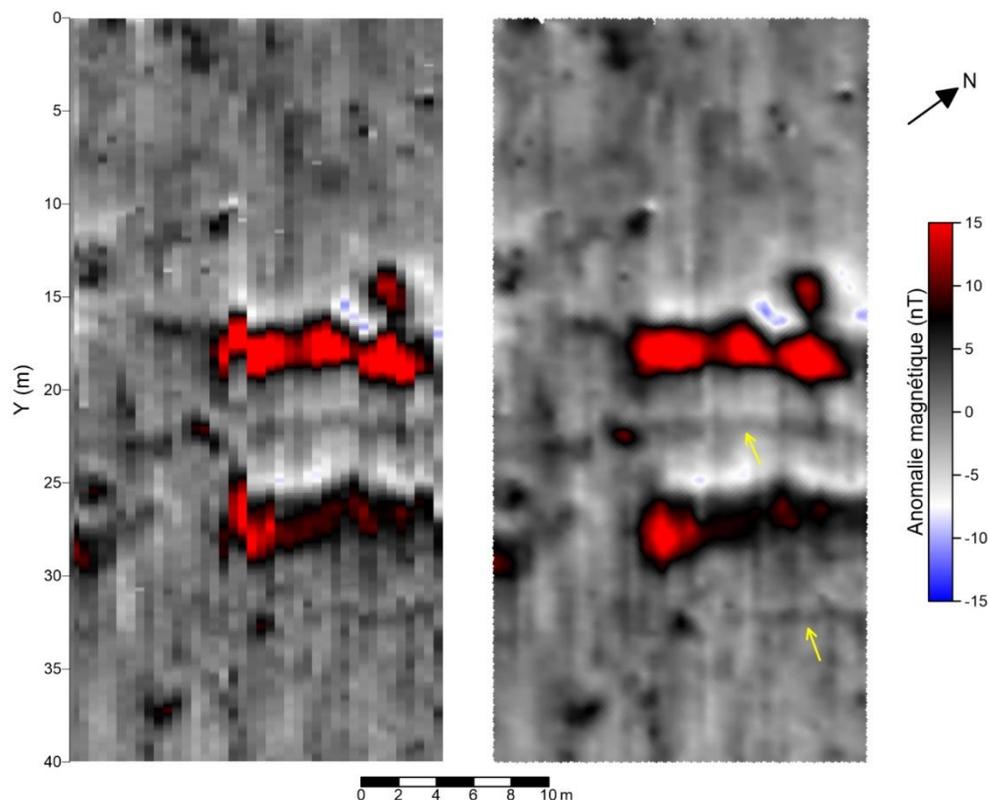


Figure 1.14 : Comparaison entre le protocole d'acquisition standard (A) et le protocole couplant magnétomètre et station totale (B). La carte magnétique A possède une maille de 0,1x0,5 m. La carte magnétique B a une maille de 0,1x0,1 m. Les deux cartes ne sont pas réduites au pôle. Les flèches jaunes indiquent deux tranchées de palissade.

La carte magnétique B est de meilleure qualité que la A (en faisant abstraction des effets visuelles liées aux mailles d'interpolation différentes). Avec le protocole standard, la carte A présente des effets de « zigzag » affectant le rendu des deux fossés néolithiques. Ces effets de « zigzag » affectent aussi la « lisibilité » des petites anomalies comme les deux palissades. En effet, la localisation des deux tranchées de palissade est plus aisée sur la carte B que sur la carte A. Les effets de linéation liée au travail du sol sont nettement moins marqués sur la carte B que sur la A. Le protocole original de prospection magnétique et les traitements des données associés apportent une réelle plus-value non-

négligeable à la qualité de la carte magnétique résultante. Il apporte notamment une meilleure détection des petites anomalies magnétiques d'origine anthropique permettant une interprétation plus complète de la carte magnétique en termes de structures archéologiques.

Par rapport au site du Pontet, la densité de mesure de position par la station totale est meilleure (Figure 1.15). Sur la carte de densité de la Garenne, l'échelle de densité est modifiée car l'espacement entre les passages est différent (1 m au lieu de 0,78 m pour le Pontet). La station totale a été positionnée suffisamment loin pour que le rayon de la zone de critique n'affecte qu'une petite partie de la zone de prospection. Sur la Garenne, environ 90 % de la surface prospectée possède une densité optimale impliquant que la position calculée des mesures magnétiques est bonne. Les tracés noirs sur la carte de densité de mesure correspondent à des profils recommencés suite au passage de véhicules.

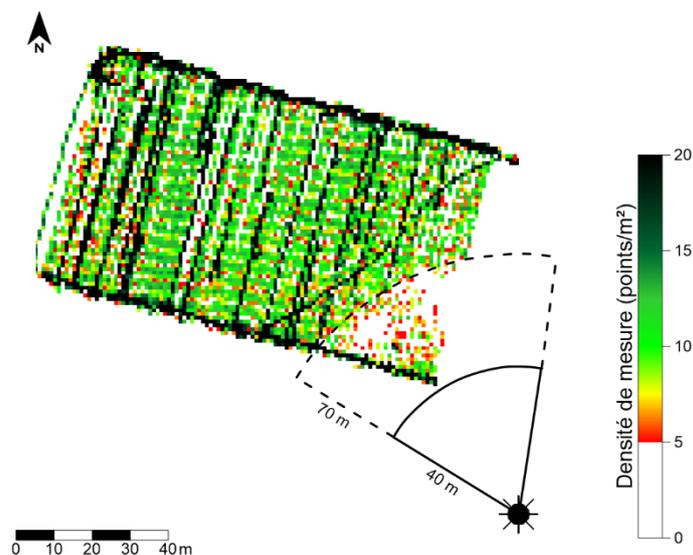


Figure 1.15 : Carte de la densité de mesure de la station totale sur le site de la Garenne. La station totale est suffisamment éloignée pour que la zone critique n'affecte qu'une partie de la prospection.

1.4.3 Apports des prospections magnétiques à la connaissance du site

Les résultats des deux cartes magnétiques acquises selon le protocole original de prospection sont présentés sur la Figure 1.16 et elles sont réduites au pôle : une carte est présentée vierge (Figure 1.16a) et l'autre est annotée (Figure 1.16b). Ces deux cartes magnétiques, principalement celle de la zone A, présente des anomalies magnétiques liées à des structures fossoyées formant une enceinte néolithique à fossés interrompus (Figure 1.16a). Cette enceinte possède une forme courbe qui se prolonge sûrement sous la parcelle de la DDE en direction de la paléo-falaise (Figure 1.13c et Figure 1.16a). Dans sa partie ouest, l'enceinte se poursuit sous la route et elle se retrouve dans la zone B. Elle se termine au niveau d'une limite géologique marquée par les pointillé orange (Figure 1.16b). Cette limite correspond à la transition entre le substrat calcaire et son recouvrement par des alluvions récentes (bri).

L'enceinte est composée par deux fossés subparallèles et discontinus (Figure 1.16b, F1 et F2) caractérisés par une forte intensité magnétique (entre 5 et 20 nT). Un troisième fossé (F3) se rattache au fossé externe de l'enceinte. Contrairement au site du Pontet et au site de Chenommet (Ard *et al.*, 2015a), les fossés externe (F1) et interne (F2) ne présentent pas de variation significative d'intensité magnétique entre eux. Ceci indique une relative homogénéité apparente du comblement. Les deux fossés présentent une géométrie légèrement différente, le fossé externe possède un tracé plus régulier que le fossé interne qui a un aspect plus « globuleux » (présence de petites indentations vers l'intérieur du site).

Les interruptions des fossés marquent la présence de quatre entrées (I1, I2, I3, I4) dont deux sont associées à des pinces de crabe (I1 et I2). Deux tranchées de palissade (Pa) sont identifiées et épousent la forme de l'enceinte. Une palissade est localisée entre les deux fossés et l'autre, à l'intérieur du site. L'enceinte de la Garenne présente une grande entrée (I3), sans pince de crabe, marquée par une interruption des fossés et des palissades. Au niveau de cette entrée et à l'intérieur du site, une structure de forme rectangulaire (H) est composée d'un alignement de petites anomalies ponctuelles de faible intensité. Elle pourrait correspondre à un bâtiment associé à l'enceinte (dimension : entre 10 m sur 5 m).

L'anomalie S est située à environ 15 m de l'extrémité des fossés et de la limite géologique. Elle est de forte intensité (environ 15 nT) et possède une forme ovale. Elle correspond certainement à une fosse. Si elle est contemporaine du site néolithique, elle est probablement recouverte par des alluvions récentes. Comme l'intensité magnétique décroît selon l'inverse du cube de la distance source-capteur (Aspinall *et al.*, 2008), cette anomalie S apparaît avec une moindre intensité magnétique que si elle était proche de la surface. Le remplissage de cette présumée fosse est certainement très magnétique : il pourrait être composé de matériaux ayant chauffé. Dans le contexte archéologique du site, cette fosse pourrait être en lien avec l'artisanat du sel durant le Néolithique.

Les fouilles de 1936 et de 1963 ne font pas mention d'enceinte néolithique, ni même de fossés. Les structures principales mises au jour étaient désignées comme des « fonds de cabane » comportant un foyer (Burgaud, 1937 ; Gabet et Massaud, 1965), qui ont été réinterprétées récemment comme des structures de chauffe pour la production du sel (Ard et Weller, 2014). Les deux campagnes de prospection magnétique apportent donc des éléments nouveaux très intéressants pour la compréhension du site de la Garenne, dont l'information majeure est la présence d'une enceinte fossoyée entourant l'espace où se situent les fosses présumées en lien avec la production de sel.

1.4.4 Approche préliminaire de la géomorphologie du site

Afin de compléter les investigations sur le site de la Garenne, une approche préliminaire de la géomorphologie locale a été effectuée en juillet 2015 par une prospection électromagnétique à l'EM38-MK2 et par une section de résistivité électrique.

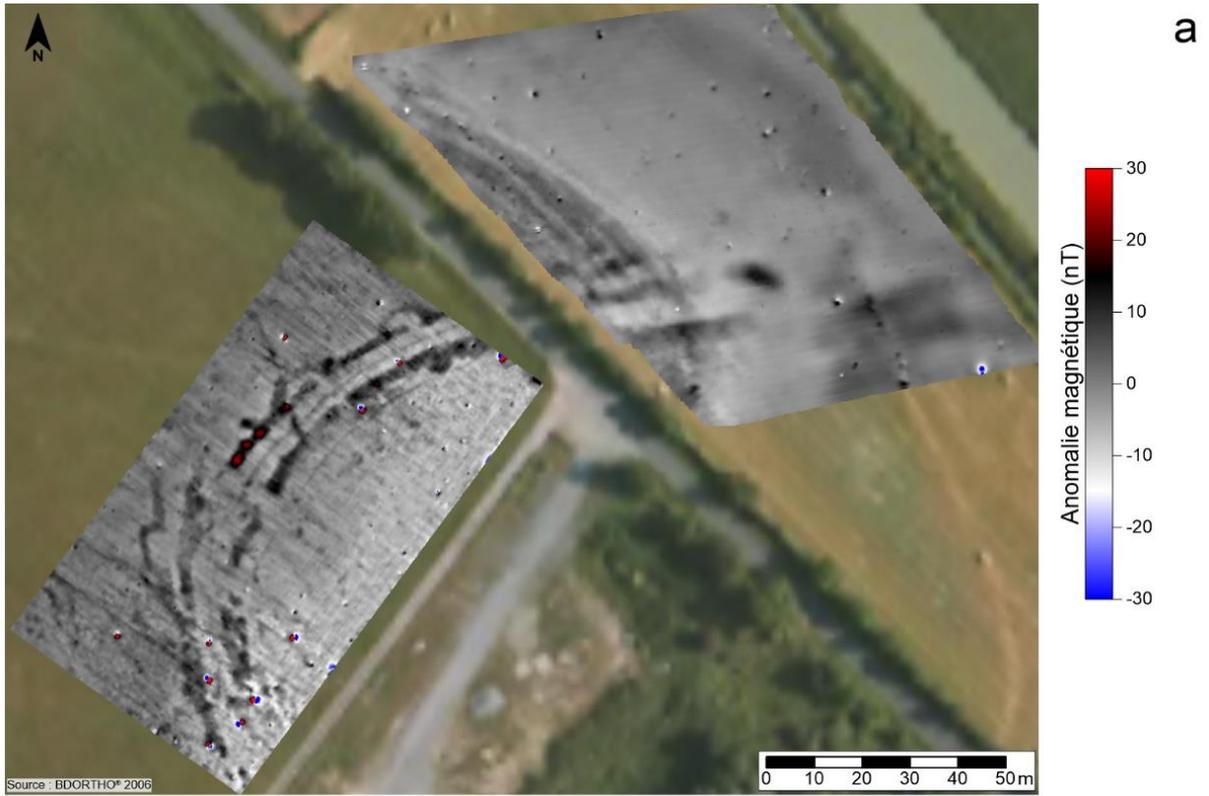


Figure 1.16 : Cartes des anomalies magnétiques réduites au pôle du site de la Garenne à Saint-Hippolyte. (a) Carte magnétique sans annotation. (b) Carte magnétique avec annotations. Les flèches vertes indiquent des parcelles anciens.

La Figure 1.17 présente des cartes de conductivité électrique apparente obtenue selon les deux écartements inter-bobines de l'EM38. L'une avec une profondeur d'investigation effective de 1,5 m (Figure 1.17a) et l'autre de 0,75 m (Figure 1.17b). Ces deux cartes mettent en évidence trois zones (Figure 1.17) :

- Une zone plus résistante (Z1) comprise entre 1 et 20 mS/m, correspondant au substrat calcaire présent en surface et recouvert par une épaisseur de sol inférieure à 0,5 m ;
- Une zone plus conductrice (Z2) comprise entre 20 et 50 mS/m, associée à des formations de colluvionnement et à des alluvions récentes ;
- Deux zones très conductrices (Z3 et Z4) supérieures à 50 mS/m, correspondant aux alluvions fluvio-marines. Les valeurs sont plus faibles à proximité du canal. Ceci est lié aux effets de drainage des fossés (Camus, 2008 ; Camus et *al.*, 2011).

La zone Z4 est la plus conductrice. Elle est localisée dans l'axe de la petite vallée et caractérise les formations alluviales du comblement de cette vallée. Dans les zones Z1 à Z3, un gradient croissant de conductivité apparente est observé depuis le site vers la Charente. Il est certainement en lien avec la topographie du toit du substrat calcaire, progressivement recouvert par les alluvions récentes dont l'épaisseur augmente en direction de la Charente.

Une pseudosection de résistivité électrique a été réalisée selon la direction SW-NE recoupant ainsi les zones Z1 à Z3 (Figure 1.17a). La section est présentée en parallèle de deux profils de conductivité apparente (Figure 1.18). Elle a été acquise avec une double configuration en Wenner-Schlumberger et dipôle-dipôle avec un écartement inter-électrodes de 1 m. Cette section montre un milieu très résistant (M1), supérieur à 150 Ω .m, présent sur la première moitié jusqu'à la position 30 m. Ce milieu est proche de la surface et caractérise le substrat calcaire. Par comparaison avec les profils de conductivité, l'augmentation de la profondeur d'apparition du substrat est cohérente avec le gradient croissant des conductivités apparentes mesurées selon les deux écartements inter-bobines. Les cartes de prospection électromagnétique mettent ainsi en évidence la topographie du substrat en surface.

Dans la zone Z2 (Figure 1.18), le substrat est surmonté par un milieu très conducteur (M2) dont l'épaisseur augmente vers le NE avec des résistivités inférieures à 50 Ω .m. Il correspond aux alluvions fluvio-marines recouvrant le substrat calcaire. Le milieu M3 est caractérisé par des résistivités comprises entre 100 et 150 Ω .m. Il semble être associé à des formations de colluvionnement (matériau calcaire) recouvertes aussi par les alluvions récentes (M2) dans la zone Z3. Un milieu plus conducteur (M4) est présent à la base de la section avec des résistivités de l'ordre de 75 Ω .m. Il pourrait correspondre aussi à des alluvions fluvio-marines.

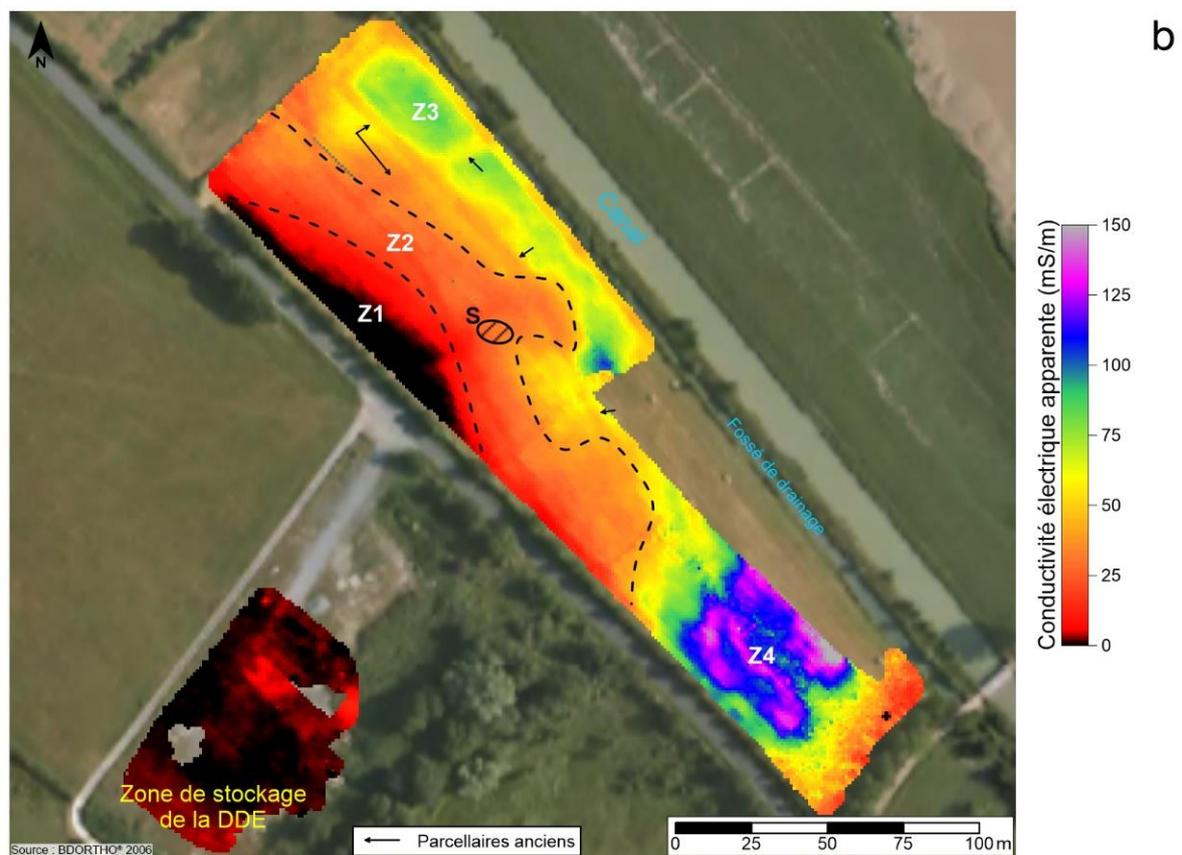
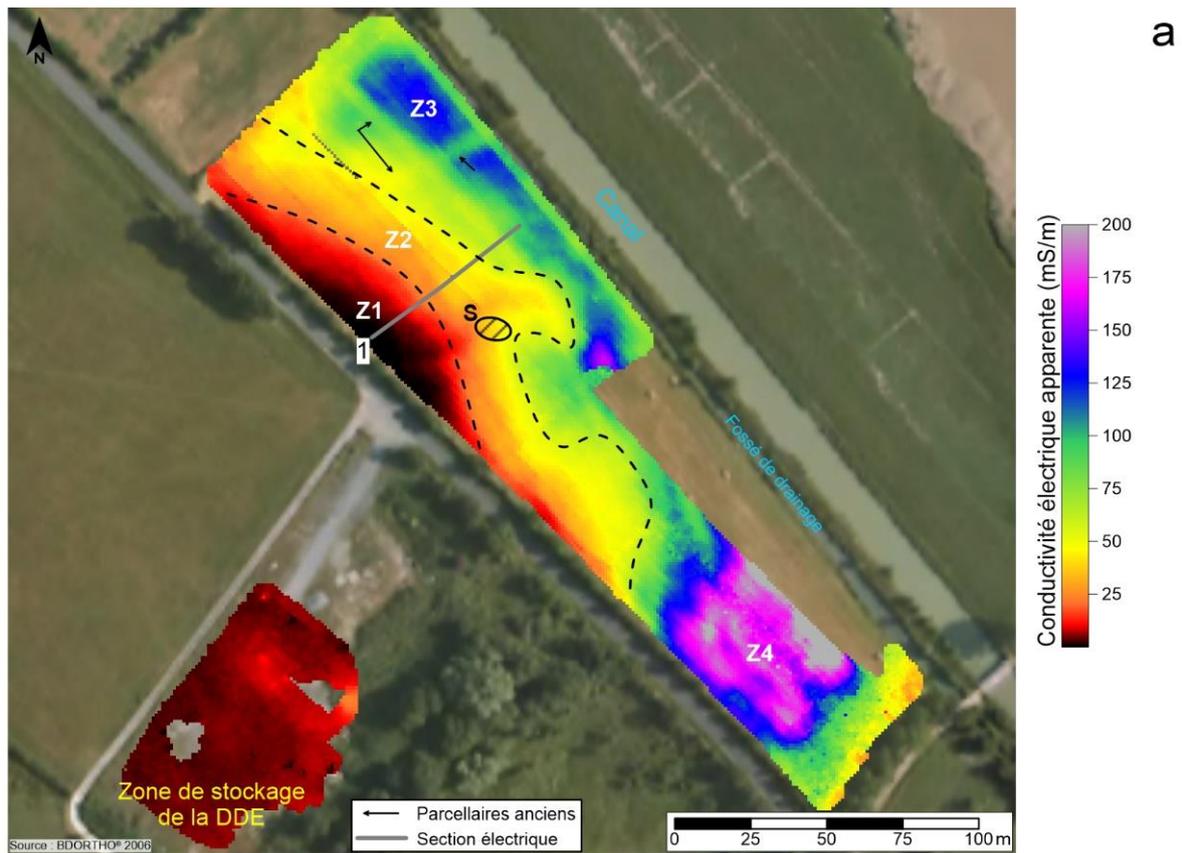


Figure 1.17 : Cartes de la conductivité électrique apparente. (a) Carte avec une profondeur d'investigation effective de 1,5 m (écartement inter-bobines de 1 m). (b) Carte avec une profondeur d'investigation effective de 0,75 m (écartement inter-bobines de 0,5 m).

Le modèle de résistivité proposé par la section électrique est cohérent avec les profils de conductivité apparente et par extrapolation aux cartes de conductivité apparente. Les zones Z1 et Z2 sont dans la continuité de la falaise calcaire formant le versant est de la petite vallée (Figure 1.17). Au niveau de la section électrique (Figure 1.18), la transition entre les milieux M1 et M3 ainsi que M1 et M4 est franche et verticale. L'hypothèse est que cette transition témoigne de la présence d'une paléo-falaise qui serait ainsi la continuité de la falaise calcaire (versant est de la vallée). Ainsi, la zone Z2 sur les cartes de conductivité apparente correspond à une paléo-falaise et à des colluvions (ou à des dépôts d'abrasion), actuellement recouvertes par des alluvions récentes.

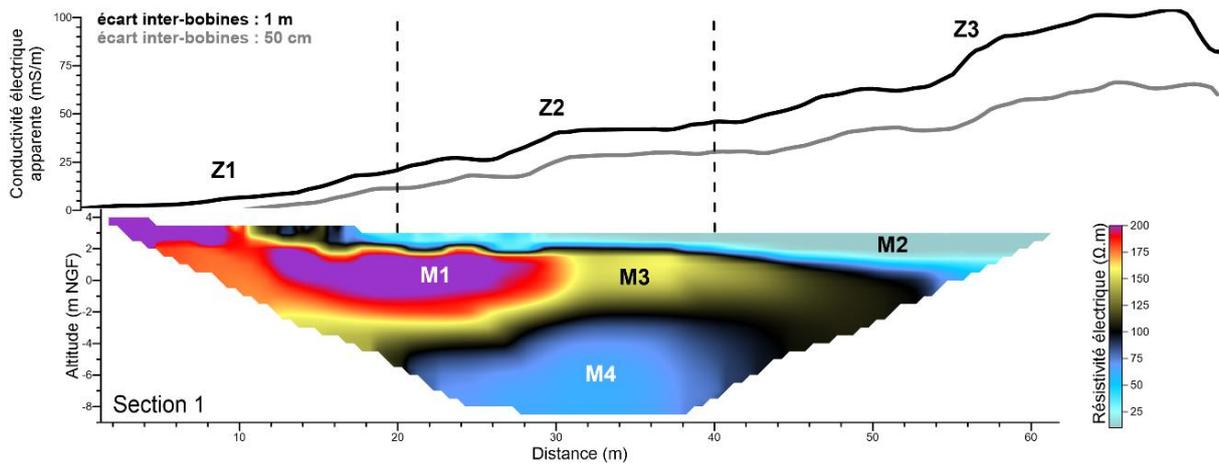


Figure 1.18 : Section de résistivité électrique réalisée avec un écartement inter-électrodes de 1 m et en double configuration Wenner-Schlumberger et dipôle-dipôle. Les profils de conductivité électrique apparente sont représentés en parallèle.

1.4.5 Interprétations croisées des prospections géophysiques

Sur la carte magnétique de la zone B (Figure 1.16b), la limite géologique identifiée est cohérente avec la limite entre Z1 et Z2 des cartes de conductivité (Figure 1.17). Sur la section de résistivité (Figure 1.18), cette limite semble correspondre à la transition entre le substrat quasi-affleurant (M1) et le substrat recouvert par les alluvions récentes (M2) au niveau de la position 12,5 m. De ce fait, les fossés sont visibles sur la carte magnétique de la zone B (Figure 1.16b) car ils reposent sur la partie quasi-affleurante du substrat calcaire.

L'anomalie S n'est pas visible sur les deux cartes de conductivité apparente (Figure 1.17). Deux hypothèses peuvent être formulées : soit elle est de même signature électrique que son encaissant, soit elle est proche de la profondeur d'investigation maximale de l'appareil. D'après la section de résistivité (Figure 1.18) et si le dépôt des alluvions récentes (M2) est postérieur à l'occupation néolithique, alors la fosse pourrait reposer sur le substrat calcaire (M1), entre les positions 25 et 30 m. Elle serait sous une épaisseur de 1,5 à 2 m d'alluvions. De ce fait, l'hypothèse la plus probable est la seconde. Ceci serait cohérent avec l'hypothèse formulée dans les paragraphes précédents concernant l'intensité du signal magnétique de cette fosse. Il est donc possible qu'elle contienne des matériaux magnétiques (ayant

chauffé), à l'image de ceux trouvés lors des anciennes fouilles (Burgaud, 1937 ; Gabet et Massaud, 1965). Elle pourrait alors être mise en relation avec l'artisanat du sel.

Les fouilles des années 1930 (Burgaud, 1937) et 1960 (Gabet et Massaud, 1965) ont été réalisées dans la parcelle de la DDE, au sud de l'enceinte néolithique (zone A). Une prospection électromagnétique y a été mise en œuvre, sans succès, afin d'identifier les vestiges des structures fouillées sous la couche de bitume recouvrant cette partie du site (Figure 1.17).

1.5 CONCLUSIONS

Le protocole original de prospection magnétique à haute résolution et haute précision de positionnement permet d'acquérir une carte magnétique de grande qualité en couplant un magnétomètre de haute précision (comme le G-858 ou le GSMP35-G) avec une station totale S8. La chaîne de traitement des données magnétiques et de positions améliore la « lisibilité », la précision et la qualité de la carte. Néanmoins, la localisation de la station totale par rapport à la zone prospectée est un paramètre déterminant qui sera mieux pris en compte lors de prochaines mises en œuvre de ce protocole.

Le site néolithique du Pontet est le site de référence de ces travaux sur le développement de la chaîne de traitement des données. Ce protocole de cartographie à haute résolution et haute précision de positionnement a montré son efficacité sur ce site à enceintes fossoyées. La carte magnétique résultante apporte de nombreuses informations sur l'organisation générale du site. Pour confirmer l'efficacité de la chaîne de traitement des données, le site néolithique de la Garenne a fait office de seconde zone de test. Par la manière dont il a été prospecté, une comparaison entre le protocole standard de prospection magnétique et le protocole original a pu être effectuée. Cette comparaison montre le réel intérêt de l'utilisation de ce protocole car il améliore vraiment la qualité de la carte. Cette plus-value n'est pas juste visuelle mais aussi interprétative. Elle permet de mieux identifier l'information archéologique contenue dans les données magnétiques, et donc de faciliter son interprétation.

2 APPROCHES MULTI-MÉTHODES ET MULTI-ÉCHELLES DU SITE NÉOLITHIQUE DU PONTET

La carte magnétique du site du Pontet montre de très nombreuses anomalies magnétiques dont certaines ont été interprétées comme des structures néolithiques. La synthèse de ces structures identifiées (non exhaustives) est illustrée sur une carte simplifiée du site (Figure 2.1a) en parallèle de la carte magnétique (Figure 2.1b). Ces deux cartes fournissent l'organisation générale du site en mettant en évidence deux enceintes fossoyées (Figure 2.1) : une imposante enceinte externe (E1) caractérisée par une entrée monumentale (I4) et une seconde (E2), composée également de plusieurs fossés discontinus. Un fossé continu formant un arc de cercle pourrait correspondre à une troisième enceinte (E3) adossée à la falaise. De nombreuses autres anomalies magnétiques ont été rattachées à des structures néolithiques comme la structure G, mais aussi des anomalies de plus petites dimensions telles de présumées fosses (K) et des trous de poteau (Figure 1.7 et 2.1 : H1, H2, H3 et L).

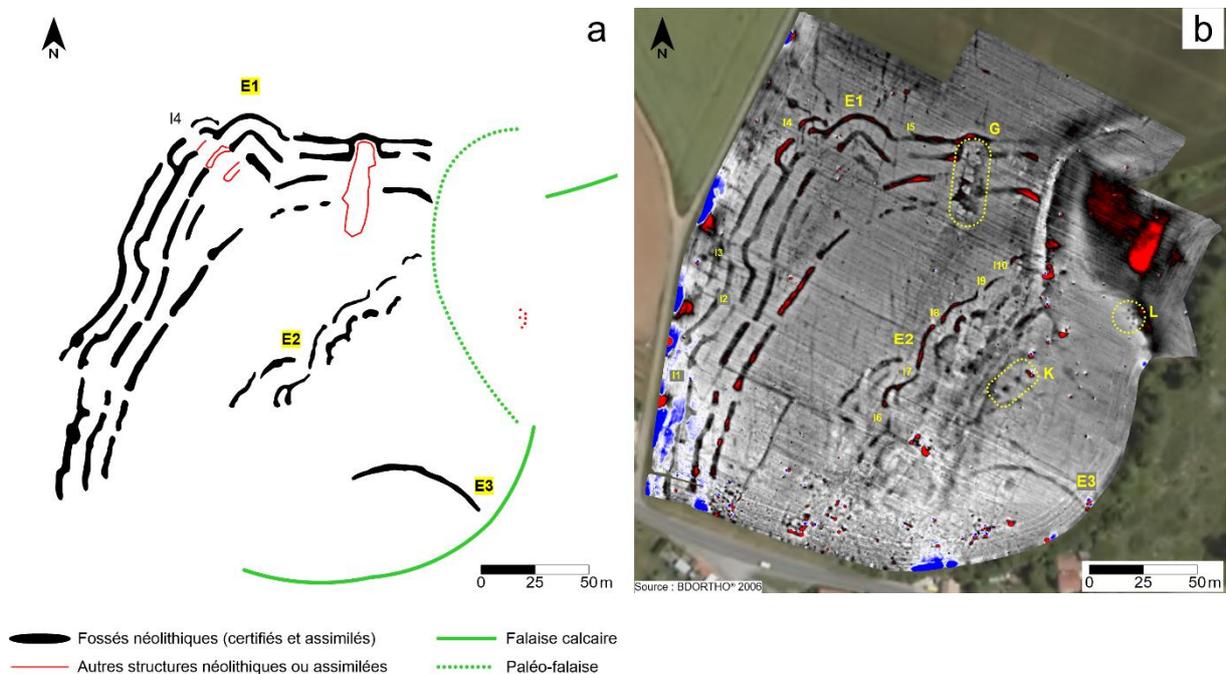


Figure 2.1 : (a) Carte synthétique des structures néolithiques identifiées du site du Pontet. (b) Carte annotée des anomalies magnétiques réduites au pôle.

Pour apporter des informations complémentaires à la carte magnétique, des prospections électriques ont été réalisées. Les cartes de la résistivité électrique apparente (ERA) sont très efficaces pour mettre en avant des structures en pierres et la géométrie du toit du substrat calcaire. Ce dernier présente un contraste électrique fort avec le sol sus-jacent. Par conséquent, les cartes électriques fournissent des informations qualitatives sur la profondeur d'apparition du substrat (Martinaud, 1990, 1997 ; Mathé et *al.*, 2011). La superposition de cartes électriques à différents écartements inter-électrodes est un moyen efficace pour déterminer qualitativement cette profondeur d'apparition (Martinaud, 1990, 1997). L'interprétation quantitative est possible via une inversion 3D des données électriques mais elle est très coûteuse en temps d'acquisition si la prospection n'est pas mécanisée

(Tabbagh et *al.*, 2000). En conséquence, des sections de résistivité électrique ont été utilisées sur le site du Pontet comme une alternative efficace pour caractériser l'épaisseur de sol, la géométrie du toit du substrat et les fossés néolithiques et la nature de leurs comblements.

La carte magnétique est une très bonne source d'informations pour guider les futures investigations archéologiques et géophysiques. L'objectif de la démarche de travail est de pouvoir cibler très précisément une zone d'intérêt pour implanter un sondage afin de répondre à une problématique spécifique. En effet, il est évident que la fouille exhaustive d'un tel site sur une telle surface est économiquement et humainement impossible, surtout dans le contexte actuel. De plus, une telle fouille n'a actuellement pas d'intérêt scientifique majeur car des enceintes néolithiques ont déjà été fouillées dans la région (Burnez et Louboutin, 1999 ; Burnez et *al.*, 2001 ; Ard et *al.*, 2009 ; Ard, 2012). Elles ont apporté beaucoup d'informations sur les structures archéologiques et aussi sur la compréhension de l'origine des anomalies magnétiques identifiées (Ard et *al.*, 2015a). Dans un contexte de conservation du patrimoine, un sondage de dimensions réduites (centaines de mètres carrés) sur une zone ciblée pour répondre à une problématique précise est donc plus approprié.

C'est une telle démarche qui a été mise en œuvre sur le site du Pontet. Un sondage de 240 m² a été implanté sur la base de la carte magnétique. Il est associé à une problématique spécifique. Cette dernière se décomposait selon trois axes : archéologique, géophysique et conservation du patrimoine. Premièrement, l'étude du site du Pontet était inscrite dans le cadre du PCR sur la « Dynamique d'occupation et d'exploitation du sel dans les golfes charentais, du Néolithique à l'Âge du Fer ». Le sondage s'est focalisé sur une zone contenant quatre présumées fosses néolithiques à l'intérieur de l'enceinte médiane (Figure 2.1b : K). Ces fosses présentaient un intérêt archéologique car elles s'apparentaient à celles identifiées sur des sites voisins (Burgaud, 1937 ; Gabet et Massaud, 1965 ; Pautreau, 1976) qui sont actuellement interprétées comme des structures de chauffe liées à l'artisanat du sel (Ard et Weller, 2014). La problématique archéologique était inscrite dans celle du PCR et le sondage devait permettre de vérifier l'association de ces structures à une exploitation du sel. Deuxièmement, le sondage est un moyen efficace pour identifier les sources anthropiques ou naturelles à l'origine des anomalies détectées par les prospections géophysiques. Il devait donc servir à identifier les sources des anomalies géophysiques et ainsi améliorer l'interprétation des données. Troisièmement, ce sondage était inscrit dans une démarche méthodologique visant à évaluer le potentiel de conservation du niveau d'occupation néolithique en l'associant à des prospections électriques, des essais géotechniques et une orthophotographie. Cette démarche méthodologique ainsi que les deux autres axes sont présentés sous la forme d'un article soumis à la revue interdisciplinaire *ArchéoSciences*.

L'ensemble des prospections géophysiques utilisées pour réaliser la démarche méthodologique pour l'estimation du potentiel de conservation d'un niveau d'occupation néolithique ainsi que toutes les autres prospections complémentaires sont illustrées sur la Figure 2.2. La très grande majorité de ces prospections ont été réalisées par les étudiants de Licence 3 de Sciences de la Terre de l'Université de

La Rochelle durant leur stage de prospection géophysique appliquée. Des cartes de résistivité électrique apparente (surface couverte totale : 1,52 ha), notées par la suite REa, et des sections électriques à différents écartements inter-électrodes ont été effectuées sur des zones particulières de la carte magnétique telles que l'anomalie G, l'entrée principale I4 et sur les trois enceintes (Figure 2.1 et 2.2). Des prospections électromagnétiques par méthode *Slingram* ont été faites sur le versant et la paléofalaise pour y déceler d'éventuelles structures géologiques sur une surface de 2,85 ha (Figure 2.2).

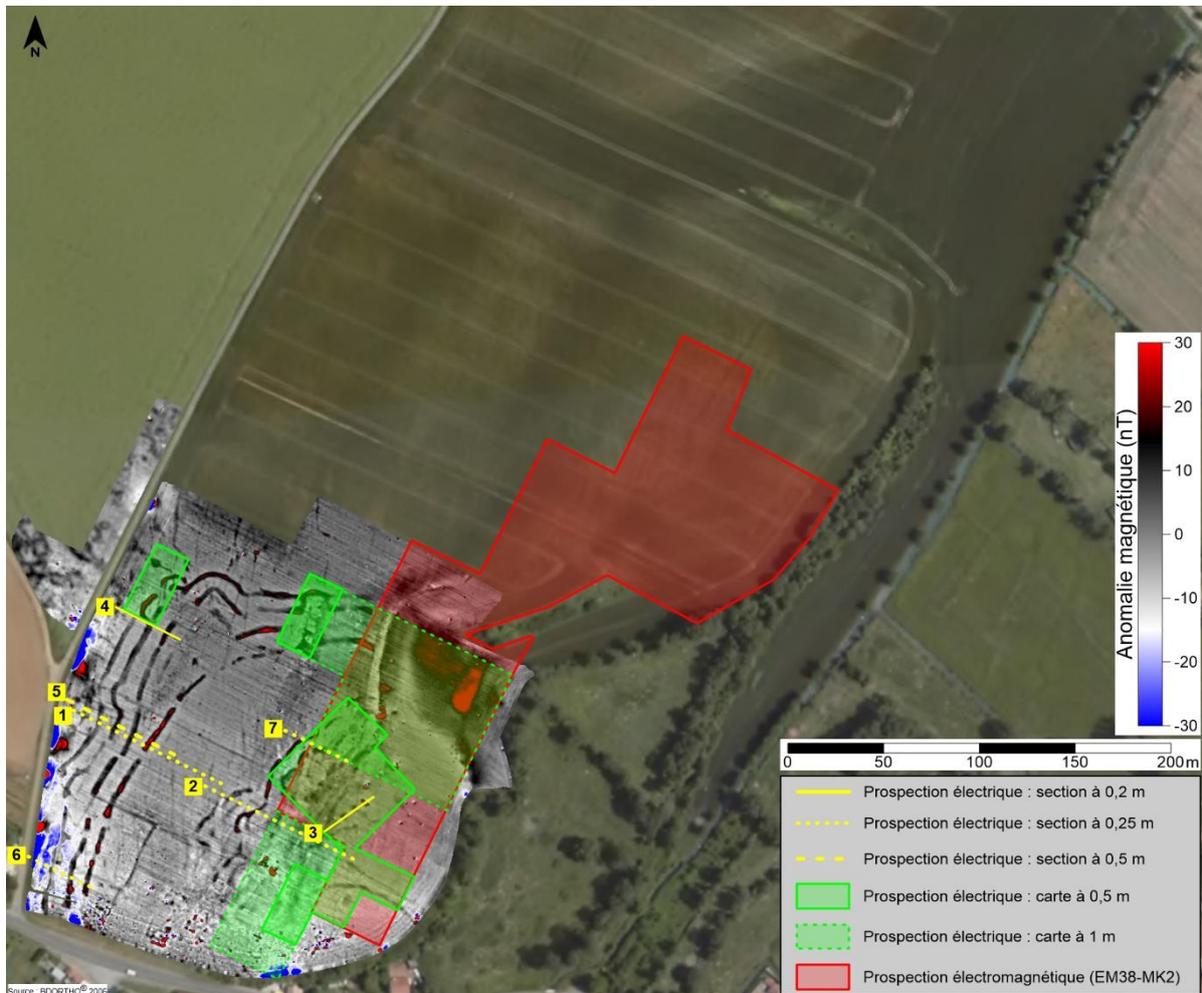


Figure 2.2 : Synthèse des emprises des prospections électriques et électromagnétiques réalisées en complément de la carte magnétique (réduite au pôle) du site néolithique du Pontet.

2.1 ESTIMATION DU POTENTIEL DE CONSERVATION D'UN NIVEAU ARCHÉOLOGIQUE NÉOLITHIQUE DANS UNE ENCEINTE FOSSOYÉE IMPLANTÉE SUR UN PLATEAU CALCAIRE

Cette partie correspond à l'article soumis dans la revue interdisciplinaire *ArchéoSciences*. Il traite d'une démarche méthodologique pour estimer le potentiel de conservation d'un niveau d'occupation néolithique. Cette démarche a été testée sur le site néolithique du Pontet. Les appels aux figures dans l'article sont propres à ce dernier. Les figures sont nommées : « AS-Figure ».

Estimation du potentiel de conservation d'un niveau archéologique néolithique dans une enceinte fossoyée implantée sur un plateau calcaire

Estimation of the potential of the Neolithic archaeological level conservation in a causewayed enclosure settled on limestone plateau

Bruniaux Guillaume¹, Mathé Vivien¹, Ard Vincent², Lévêque François¹

¹ UMR 7266 – LIENSs, Université de La Rochelle – CNRS, 2 rue Olympe de Gouges, 17000 La Rochelle

² UMR 5608 – TRACES, Université de Toulouse – CNRS, 5 allée Antonio-Machado, 31058 Toulouse cedex 9

Auteur de correspondance : Bruniaux Guillaume, guillaume.bruniaux@univ-lr.fr

E-mail :

Mathé Vivien, vivien.mathe@univ-lr.fr ; Ard Vincent, vincent.ard@univ-tlse2.fr ; Lévêque François, francois.leveque@univ-lr.fr.

Résumé

Les enceintes fossoyées du Néolithique implantées sur un plateau calcaire s'étendent sur plusieurs hectares. L'étude de tels sites par des fouilles exhaustives est peu réaliste compte tenu des coûts financiers et humains, ainsi que de la durée d'intervention qu'un tel chantier implique. Pour obtenir une vision d'ensemble du site, il peut être utile de faire appel aux méthodes de prospection géophysique qui apportent une cartographie détaillée de ces enceintes. Néanmoins, la fouille reste indispensable pour déterminer la période d'occupation et les vestiges archéologiques associés. Cet article propose un protocole, appliqué à une enceinte fossoyée, fondé sur une prospection magnétique exhaustive du site. Le croisement des résultats de prospections électriques sur des zones spécifiques avec l'information portée par une orthophotographie et un sondage archéologique d'extension limitée fournissent une estimation de la variation spatiale de l'épaisseur de sol recouvrant le substrat. L'estimation de l'épaisseur de sol apporte une information sur la conservation potentielle d'un niveau d'occupation néolithique. Cette démarche vise à guider les prochaines investigations archéologiques sur un site néolithique de même nature et s'inscrit aussi dans une politique de conservation du patrimoine.

Mots-clés : Enceinte fossoyée, Épaisseur de sol, Niveau d'occupation néolithique, Potentiel archéologique, Prospection géophysique, Sondage archéologique,

Abstract

Neolithic causewayed enclosures situated on limestone plateau stretch on several hectares. The study of such sites by exhaustive archaeological excavations is rather realist given human and financial costs as well as the intervention time that such excavation implies. To obtain a site overview, it may be useful to use geophysical prospecting methods which give detailed cartography of these enclosures. Nevertheless, the archaeological excavation stays indispensable to determine the occupation period and associated archaeological remains. This paper proposes a protocol, applied to a causewayed enclosure, based on an exhaustive magnetic survey of the site. The cross-results of electrical surveys on specific areas with the information provided by an orthophotography and an archaeological test excavation of limited extension give a spatial variability estimation of the soil thickness covering the substratum. The soil thickness estimation gives an information about the potential conservation of a Neolithic occupation level. The approach aims to provide future archaeological investigations on a Neolithic site of same type and is also incorporated within the framework of a heritage conservation policy.

Keyword: *Archaeological excavation test, Archaeological potential, Causewayed enclosure, Geophysical survey, Neolithic occupation level, Soil thickness.*

1 INTRODUCTION

Les sites néolithiques à enceintes fossoyées du Centre-Ouest de la France s'étendent sur des surfaces de quelques hectares à plus d'une dizaine d'hectares (Joussaume, 1995 ; Burnez et Louboutin, 1999). Une fouille exhaustive est donc complexe à mettre en œuvre car les coûts financiers et humains sont importants et elle implique une longue immobilisation des terres, le plus souvent agricoles. D'autre part, dans une logique de préservation du patrimoine, il n'est pas souhaitable de réaliser une mise au jour intégrale des structures archéologiques mais plutôt de limiter les fouilles à des zones d'intérêt archéologique. Il est alors essentiel pour l'implantation d'une fouille de quelques milliers de mètres carrés d'acquérir des informations sur l'état de conservation des vestiges dans la zone identifiée.

Les premières sources d'information proviennent de l'exploitation de la documentation des fouilles antérieures et des photographies aériennes (prises au moment propice pour observer des contrastes de développement de la végétation). Elles fournissent une première estimation du potentiel du site. La prospection géophysique, principalement avec la méthode magnétique, permet de cartographier à des résolutions spatiales élevées, en des temps limités, les fossés des enceintes néolithiques et parfois des structures internes (fosses, trous de poteau, etc.). La méthode magnétique consiste à mesurer la déformation locale du champ magnétique terrestre. Ces déformations proviennent du contraste d'aimantation entre le substrat calcaire (peu magnétique) et les structures fossoyées (plus magnétiques). Différentes études en Europe (Hasek et Kovarnik, 1999 ; Lück et Eisenreich, 1999 ; Doneus et *al.*, 2001 ; Křivánek, 2006 ; Kalaycı et Sarris, 2016) et en France (Martinaud, 2005 ; Mathé et *al.*, 2012 ; Ard et *al.*, 2015 ; Bruniaux et *al.*, sous presse) illustrent particulièrement l'efficacité de la méthode magnétique sur de tels sites.

À l'intérieur des enceintes fossoyées, des niveaux d'occupation peuvent aussi être conservés à condition qu'ils soient plus profonds que la semelle de labour (Laporte et *al.*, 2009c). Par exemple, dans la région, des sites localisés en basse terre, près d'anciennes zones humides littorales, présentent un niveau d'occupation conservé sous une épaisseur de dépôts supérieure à une vingtaine de centimètres (Hénaff et Olivet, 2009 ; Soler et *al.*, 2010). Dans d'autres cas, cette épaisseur est inférieure au labour,

alors le sol archéologique est en partie érodé (Laporte, 2009) ou n'est rencontré que dans des dépressions du substrat (Hénaff et Olivet, 2009). Sur des sites de hauteur établis sur un substrat calcaire, l'épaisseur de sol est trop faible et la couche archéologique n'est pas conservée car elle a été remaniée ou érodée par le travail du sol. Néanmoins, la présence de structures archéologiques en creux à l'intérieur des enceintes (trous de poteau, fosses, tranchées de palissade...) est avérée, même si leurs parties supérieures sont régulièrement tronquées par le labour (Ard, 2012 ; Soler, 2012).

Cet article propose donc un protocole faisant appel à différentes disciplines et méthodes de prospection pour estimer la variation spatiale du potentiel de conservation du niveau d'occupation néolithique au sein d'une enceinte fossoyée implantée sur un substrat calcaire. Le site néolithique choisi est localisé sur la façade atlantique de la France, en Charente-Maritime. La démarche de ce travail exploite trois échelles d'observation cartographique allant de :

- L'intégralité du site (5 ha) avec une photographie aérienne et une carte des anomalies magnétiques à haute résolution ;
- Des zones spécifiques couvertes en prospection électrique sur 0,7 ha ;
- À une échelle plus réduite, un sondage archéologique de 240 m², positionnée en fonction des structures identifiées par les données géophysiques.

Ces différentes échelles d'observation apportent une vision tantôt globale et tantôt précise du site. Le sondage archéologique fournit des informations complémentaires à la géophysique, notamment sur la chronologie et la nature des occupations et, pour les problématiques développées ici, sur la profondeur d'apparition des vestiges et d'un niveau d'occupation néolithique. La conservation de ce niveau, comme l'a révélé le sondage, est conditionnée par son enfouissement sous une certaine épaisseur de sol, le protégeant notamment du labour. Cette étude est basée sur le postulat que le potentiel de conservation du niveau archéologique d'un tel site est fonction de l'épaisseur de sol développé sur le substrat (ici le sol est abordé comme une couverture de surface recouvrant le substrat).

Sur le site du Pontet, cette couverture de surface peut se décomposer sous trois entités : l'horizon superficiel (incluant le labour), le niveau d'occupation archéologique et un horizon de décarbonatation

(localement présent sur le site). Trois modes d'investigation ont été employés pour déterminer l'épaisseur de sol et la profondeur d'apparition du substrat calcaire :

- Une méthode géophysique : des sections de résistivité électriques. Chacune correspond à un modèle de la géométrie de la subsurface selon un plan vertical ;
- Une méthode géotechnique : des essais pénétrométriques donnant une estimation ponctuelle de la profondeur d'apparition du toit du substrat calcaire ;
- Un sondage archéologique fournissant des mesures de profondeur d'apparition des vestiges et du substrat ainsi qu'une interprétation détaillée de la stratigraphie locale.

Cet article présente un protocole exploitant les informations issues de trois disciplines pour modéliser la puissance du sol recouvrant le substrat. Son aboutissement est une estimation du potentiel de conservation du niveau d'occupation archéologique sur l'ensemble du site.

2 LE SITE NÉOLITHIQUE DU PONTET : ÉTAT DES CONNAISSANCES

Le site néolithique du Pontet, commune de Saint-Nazaire-sur-Charente (Charente-Maritime, France), est localisé sur la façade atlantique de la France, au sud de La Rochelle, à environ 5 km de l'estuaire de la Charente (AS-Figure 1a). Il est implanté sur le plateau calcaire d'une petite vallée perpendiculaire au cours de ce fleuve dont les versants sont des paléo-falaises (AS-Figure 1b). La base des paléo-falaises est caractérisée par les formations du Cénomaniens supérieur de Port-des-Barques recouverte par les *Marnes grises à Exogyra Columba gigas* composant la partie basale du Turonien inférieur ayant une puissance de 5 m à Soubise (Bourgueil et *al.*, 1972). La partie sommitale correspond aux *Calcaires à Céphalopodes* qui sont grisâtres, durs et présentent des faciès crayeux, graveleux et parfois saccharoïdes dont la puissance est de 8 à 10 m (Bourgueil et *al.*, 1972 ; Platel, 1996). Ces calcaires forment la partie supérieure de la paléo-falaise et affleurent sur la majorité du plateau bordant la petite vallée du Grand Ecours (AS-Figure 1b). La limite géologique entre le Turonien inférieur et moyen est présente à l'extrême ouest du site (AS-Figure 1a). Dans la région, la base du Turonien moyen est composée par des calcaires crayeux blancs similaires à ceux du Turonien inférieur (Moreau et Platel, 1982). La distinction entre le Turonien inférieur et moyen est principalement d'ordre biostratigraphique

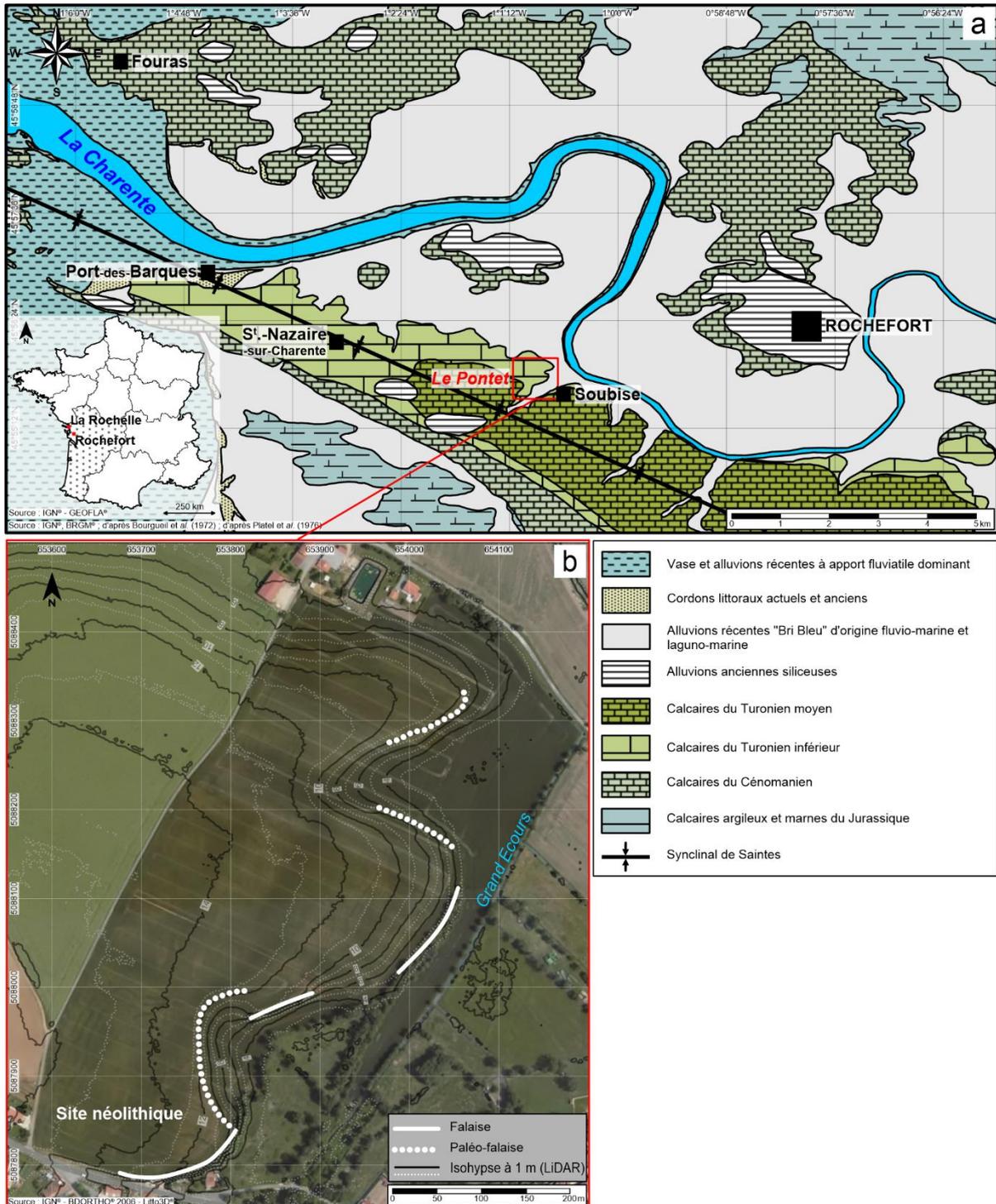
avec la première occurrence de *Collignoniceras woollgari* (Kennedy et Gale, 2016 ; *Com. Pers.* Pr. Didier Néraudeau, Université de Rennes 1). Le fond de vallée est comblé par des alluvions fluvio-marines récentes, appelées « bri » caractérisant les formations holocènes du marais de Rochefort (Bourgueil et *al.*, 1972).

Le site du Pontet a été découvert en 2011 par Éric Bouchet à partir des photographies aériennes de la BD ORTHO® 2006 de l'IGN (Institut Géographique National). Une enceinte fossoyée composée de quatre fossés subparallèles et discontinus se distingue grâce aux anomalies de croissance du blé (AS-Figure 1b ; date du cliché : 4 juin 2006). Le matériel ramassé en surface lors de prospection pédestre par Michel Favre permet de soupçonner l'existence d'un site daté du Néolithique final (culture peu-richardienne et/ou Artenac ; Burnez et *al.*, 2001).

En 2015, une prospection magnétique à haute résolution et haute précision a été réalisée sur le site à l'aide d'un protocole original couplant un magnétomètre à pompage optique (G-858, *Geometric*) et une station totale (S8, *Trimble*). La carte magnétique résultante (AS-Figure 2) précise la géométrie de l'enceinte fossoyée, E1, identifiée sur les clichés aériens (AS-Figure 1b), et met en évidence une seconde enceinte, E2, voir une troisième, E3 (AS-Figure 2 ; Bruniaux et *al.*, accepté). Les deux enceintes, E1 et E2, sont respectivement composée de quatre et deux fossés subparallèles et discontinus. Leurs interruptions marquent la présence d'au moins dix entrée (I1 à I10) dont deux plus imposantes avec des aménagements en *pinces de crabe* (I4 et I6), architecture typique du Centre-Ouest (Burnez et Louboutin, 1999). La potentielle troisième enceinte (E3) est composée d'un unique fossé.

Sur la carte magnétique, la partie interne de la seconde enceinte (E2 ; AS-Figure 2) est bruitée et difficilement lisible par la présence de nombreuses anomalies. De plus, quatre anomalies magnétiques alignées, de forme circulaire et d'un diamètre moyen de 3 à 4 m, apparaissent plus énigmatiques. Leurs dimensions et leurs emplacements à l'intérieur de l'enceinte rappellent la configuration des fosses de sites voisins peu-richardiens (Néolithique récent II) de la Garenne à Saint-Hippolyte à 7 km à l'est de Rochefort (Burgaud, 1937 ; Gabet et Massaud, 1965) et de la Sauzaie à Soubise (Pautreau, 1976) qui sont aujourd'hui réinterprétées comme de possibles structures de chauffe liées à l'exploitation du sel (Ard et Weller, 2014). Pour éprouver cette interprétation et tenter de comprendre le signal bruité, un

sondage archéologique d'emprise réduite a été programmé sur ces fosses et sur une partie de la zone bruitée de la carte magnétique.

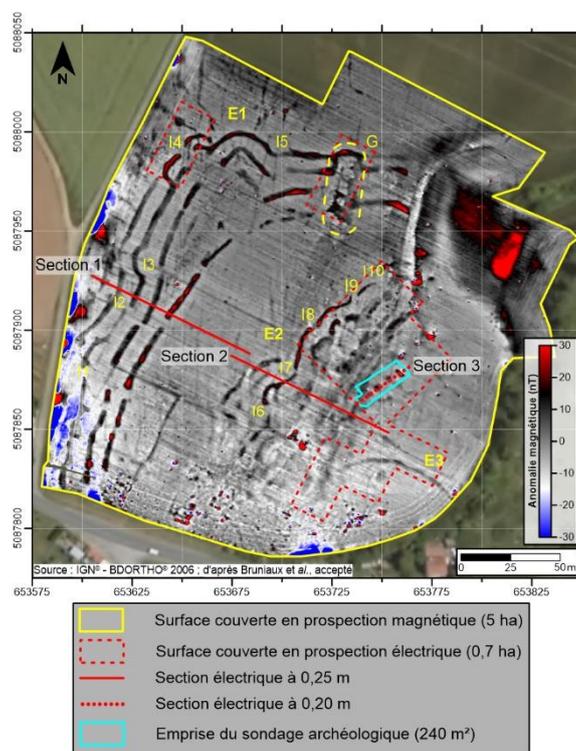


AS-Figure 1 : Localisation et contexte géologique du site néolithique du Pontet. (a) Carte géologique simplifiée de Rochefort. (b) Orthophotographie du site avec un modèle numérique d'élévation (MNE) issu du produit Litto3D®.

AS-Figure 1 : Geological context and localisation of the Neolithic site of Le Pontet. (a) Simplified geological map of Rochefort. (b) Orthophotography of the site with an elevation digital model from the Litto3D® product.

3 MATÉRIELS ET MÉTHODES COMPLÉMENTAIRES

La carte magnétique présente l'organisation générale du site du Pontet (AS-Figure 2) en mettant en évidence un système de double enceinte fossoyée (E1 et E2) et voir d'une troisième (E3). Cette carte est une très bonne base de travail pour estimer au premier abord les zones à fort intérêt archéologique. Néanmoins, une telle carte ne nous informe *a priori* pas sur la conservation éventuelle d'un niveau archéologique, fortement dépendante de l'épaisseur de sol développée sur le substrat. En complément de la prospection, des investigations électriques, un sondage archéologique et des essais pénétrométriques ont été effectués pour estimer cette épaisseur. L'extrapolation à l'ensemble du site de l'épaisseur de sol estimée est effectuée par l'orthophotographie.



AS-Figure 2 : Carte des anomalies magnétiques réduites aux pôles du site du Pontet. Localisation des prospections électriques (cartes et sections) et du sondage archéologique.

AS-Figure 2 : Map of magnetic anomalies with reduction to the pole of the site of Le Pontet. localisation of electrical surveys (maps and sections) and the archaeological excavation.

3.1 Orthophotographies et photo-interprétation

Les orthophotographies de la BD ORTHO® 2006 de l'IGN correspondent à une mosaïque de photographies aériennes numériques couvrant le territoire français. Elles sont réalisées dans le cadre du

Référentiel géographique à Grande Échelle (RGE® ; IGN, 2004). Elles sont acquises avec une caméra numérique à capteurs matriciels, IGN V1 (Kodak KAF-16801LE), conçue par le laboratoire LOEMI de l'IGN avec une résolution de 4096x4096 pixels, soit 16 mégapixels. La caméra enregistre l'intensité du rayonnement réfléchi pour des bandes spectrales correspondant aux trois couleurs primaires rouge, vert et bleu (RVB) et le proche infrarouge (PIR ; Souchon et *al.*, 2006 ; Hangouët et *al.*, 2014). La radiométrie est codée sous 12 bits par canal dans l'espace RVB et PIR dont les valeurs s'étendent de 0 à 255 (Robin, 1995 ; Souchon et *al.*, 2006).

Lors d'un passage, le recouvrement entre deux images successives est d'environ 60 % et de l'ordre de 35 % entre deux passages voisins. Ce recouvrement associé aux capteurs matriciels couplés avec un dispositifs optiques à perspective conique permettent de limiter les discontinuités de superposition dans la mosaïque finale (Hangouët et *al.*, 2014). Les données de positionnement et d'orientation de la prise de vue et les paramètres de la caméra permettent d'ortho-rectifier l'ensemble des clichés aériens par photogrammétrie. Une mosaïque des images ortho-rectifiées génère ainsi une seule image en vraie couleur, appelée orthophotographie (IGN, 2004). La résolution *GSD* (*Ground Sampling Distance*) est de 0,5 m avec une précision planimétrique de 0,9 m.

L'orthophotographie de la BD ORTHO® 2006 du site du Pontet témoigne d'une croissance différentielle de la culture du blé (AS-Figure 1b). Ces indices phytographiques apparaissent durant les périodes sèches quand le taux d'évapotranspiration du sol est supérieur au taux de précipitation. La croissance du blé est soumise à un stress hydrique qui est plus important dans les zones où l'épaisseur de sol est la plus faible. Ces zones ont une capacité de rétention de l'eau plus faible (couleurs plus claires). Les fossés néolithiques et autres dépressions naturelles ou anthropiques ont une capacité de rétention plus forte, liées à une épaisseur de sol et notamment une teneur en argile plus importantes (couleurs plus foncées ; Stanjek et Fassbinder, 1995). Ce phénomène est bien marqué sur le site du Pontet car le substrat calcaire présente de nombreuses diaclases facilitant le drainage de l'eau surtout lorsqu'il est quasi-affleurant.

3.2 Prospection électrique : cartes de la résistivité électrique apparente

La résistivité électrique est un paramètre exprimant la difficulté d'un courant électrique à circuler dans un volume donné. Elle s'exprime en ohmmètre ($\Omega.m$). Elle est principalement sensible à la nature lithologique, la granulométrie, la teneur en eau et à la salinité. Dans le sol, la circulation d'un courant électrique est surtout influencée par la mobilité des charges ioniques en solution dans les pores et l'eau interstitielle (conduction électrolytique) et par les cations présents sur la surface des argiles (conduction surfacique). Entre le sol et le substrat calcaire, le contraste de résistivité est principalement lié à une fraction argileuse plus importante ainsi qu'à une porosité ouverte et à une teneur en eau plus élevée dans le sol que dans le substrat calcaire. De ce fait, les zones avec un sol plus épais auront une résistivité électrique plus faible que celles avec une épaisseur moindre (proximité du substrat).

La prospection électrique a été effectuée avec un résistivimètre RM15 (*Geoscan Research*) spécialement conçu pour l'archéologie. Il est connecté à quatre électrodes dont deux injectent un courant électrique dans le sol (dites électrodes d'injection) et deux autres mesurent la différence de potentiel électrique (dites électrodes de potentiel) pour mesurer la résistance électrique du sol. Les électrodes sont disposées en configuration pôle-pôle. Deux électrodes (une d'injection et une de potentiel) sont installées sur le châssis et sont dites mobiles car déplacées pour effectuer les mesures de résistance électrique sur le terrain. Les deux autres sont fixes et disposées à environ cent fois l'écart inter-électrodes des mobiles (Martinaud, 1990). Les résistances mesurées sont converties en résistivité électrique selon la Loi d'Ohm. Cette dernière est alors qualifiée d'apparente car elle intègre un volume de sol donné, soit une « moyenne pondérée » des hétérogénéités des résistivités de la subsurface. La profondeur d'investigation en configuration pôle-pôle est de l'ordre de l'écartement inter-électrodes et la répartition des résistivités électriques apparentes mesurées est proche de la morphologie des structures prospectées (Martinaud, 1997).

La prospection électrique a été réalisée sur quatre parties du site. Une première carte de la résistivité électrique apparente est située dans la partie sud du site et recouvre l'enceinte E3 (AS-Figure 2). Une autre a été implantée au niveau de la zone de fouille et réalisée en amont de celle-ci. Elle recouvre une partie de la zone bruitée de la carte magnétique. La troisième carte électrique est localisée

sur l'enceinte externe (E1), sur une anomalie magnétique particulière orientée NNE-SSW et recoupant les fossés néolithiques (G). La dernière a été positionnée au niveau de la grande entrée I4. Les prospections ont été réalisées selon une maille carrée de 0,5 m de côté. Les données ont été acquises dans un référentiel local et le carroyage a été relevé par une station totale puis géoréférencé dans un repère géographique.

3.3 Prospection électrique : sections de résistivité électrique

Les sections de résistivité électrique sont des modèles de la répartition des résistivités de la subsurface selon un plan vertical. Elles fournissent une estimation de la profondeur des structures archéologiques et de l'épaisseur du sol développé sur le substrat calcaire ainsi que les variations latérales de sa géométrie. Les sections électriques sont acquises à l'aide de soixante-quatre électrodes alignées le long d'un profil et espacées d'un même écartement. L'écartement inter-électrodes conditionnent la profondeur d'investigation maximale et sa résolution verticale (qui décroît avec la profondeur) : un petit écartement permet une meilleure résolution verticale au détriment de la profondeur d'investigation maximale. Deux sections électriques ont été réalisées avec un écartement inter-électrodes de 0,25 m et positionnées en travers des deux systèmes de fossés E1 et E2 (section 1 et 2, AS-Figure 2). Cet écartement permet une profondeur d'investigation maximale de l'ordre 3 m sous la surface avec une résolution verticale suffisante (entre 0,125 et 0,75 m entre la surface et le premier tiers de la section) pour caractériser les structures archéologiques et estimer la profondeur d'apparition du substrat. Une autre section a été effectuées avec un écartement de 0,20 m. Réalisée avant la fouille, elle est localisée en travers du sondage archéologique (section 3). Sa profondeur d'investigation maximale est d'environ 2,6 m et sa résolution verticale est légèrement plus élevée que les deux précédentes afin de mieux caractériser les structures archéologiques et l'épaisseur de sol au niveau du sondage (entre 0,1 et 0.6 m entre la surface et le premier tiers de la section).

Les électrodes sont raccordées à deux câbles multi-prises (flûtes) qui sont connectés à un résistivimètre Terrameter LS (*ABEM*). L'appareil exécute une séquence programmée de mesures permettant d'acquérir une pseudo-section de résistivité électrique apparente. La pseudo-section n'étant qu'une représentation des mesures avec des profondeurs ne correspondant pas à la réalité (pseudo-

profondeur), elle est inversée à l'aide du logiciel Res2Dinv (*Geotomo Software*). Ce dernier exécute un algorithme d'inversion itératif basé sur *la méthode de moindre carré à lissage contraint* pour obtenir une section modélisée de résistivité électrique et fournir une estimation de la profondeur réelle des structures du sous-sol (Loke et Barker, 1996 ; Loke et *al.*, 2003 ; Loke, 2014).

La configuration du quadripôle est le dipôle-dipôle car il permet une relative rapidité d'acquisition des mesures. Le dipôle-dipôle possède aussi une bonne qualité de restitution des structures archéologiques et naturelles de la subsurface avec une bonne sensibilité sur les variations latérales des résistivités. Cette configuration est bien adaptée pour la restitution des structure en forme de fossé avec une bonne résolution dans les deux premiers tiers de la pseudo-section de résistivité électrique apparente (Dahlin et Zhou, 2004).

3.4 Essais pénétrométriques

Les essais pénétrométriques consistent à mesurer ponctuellement la profondeur d'apparition du toit du substrat calcaire sous la surface. Ils sont réalisés à l'aide d'un pénétromètre dynamique léger à énergie variable de type PANDA® 2 (*Sol Solution*). Ils ont été positionnés en parallèle des sections électriques 1 et 2, près de la grande entrée I4 et dans le secteur près l'enceinte E3 (AS-Figure 2).

Cet outil, emprunté à la géotechnique, mesure la résistance à l'enfoncement dans le sol par battage successif d'une pointe en acier visée à l'extrémité d'un train de tige. Le paramètre quantifié est la résistance de pointe, exprimée en mégapascal (MPa). Il est globalement sensible à la granulométrie et à la teneur en eau du sédiment. Les valeurs de résistance de pointe sont représentées en fonction de la profondeur (pénérogramme). Le pénétromètre PANDA® 2 a été détourné de son usage traditionnel pour être appliqué à l'archéologie (Lenoble et Martinaud, 2003 ; Laurent, 2007). Il peut être considéré comme une méthode d'investigation très complémentaire des sections de résistivité électrique (Martinaud et *al.*, 1999 ; Cosenza et *al.*, 2006).

Pour cette étude, le pénérogramme fournit la profondeur supposée d'apparition du toit du substrat quand la pointe est stoppée (profondeur de refus). Plusieurs sources d'erreur peuvent intervenir comme la présence d'un bloc calcaire isolé donnant une profondeur de refus au-dessus du substrat.

L'inverse se produit dans le cas d'une anfractuosité locale ou d'un substrat très altéré ayant une signature mécanique proche de celle du sol (Martinaud et *al.*, 1999). Pour ces raisons, la profondeur donnée devra être considérée comme une estimation ponctuelle de la profondeur d'apparition du toit du substrat et non comme une profondeur absolue.

3.5 Sondage archéologique

L'opération de fouille a duré 6 jours, sous la direction de Vincent Ard, avec une équipe de huit à dix fouilleurs bénévoles par jour. La surface décapée, d'environ 240 m², se présentait sous une forme rectangulaire d'orientation NE-SO et de 23 à 29 m de long pour une largeur moyenne de 9 m (AS-Figure 2).

En plus des questionnements sur la chronologie des occupations du site et sur la caractérisation des fosses repérées en prospection géophysique, le sondage archéologique avait notamment pour objectif d'obtenir un enregistrement local direct de la stratigraphie du site, des différents matériaux et structures composants le sol et de l'hétérogénéité du substrat. Des mesures directes de l'épaisseur de sol et de la profondeur d'apparition du calcaire ont été réalisées. Ces informations permettent de mieux comprendre l'origine des variations des mesures géophysiques faites au préalable de la fouille, des mesures certes extensives mais ne permettant au mieux que de modéliser la stratigraphie (nature et profondeur de chaque unité) de manière indirecte.

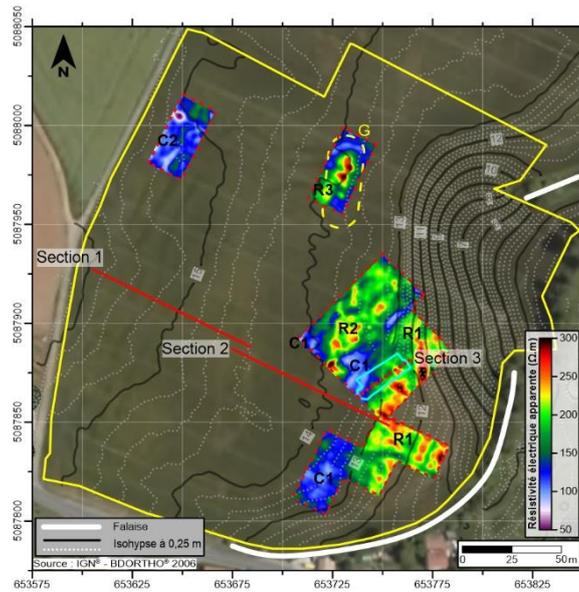
4 DONNÉES COMPLÉMENTAIRES : PROSPECTIONS ÉLECTRIQUE ET SONDAGE ARCHÉOLOGIQUE

4.1 Apport des prospections électriques

Les cartes de la résistivité électrique apparente sont présentées sur la AS-Figure 3. Les variations spatiales de la résistivité apparente sont essentiellement liées à l'épaisseur de sol recouvrant le substrat calcaire. Ces cartes traduisent, en première approximation, la topographie du toit du substrat qui s'avère fortement variable. Des zones plus conductrices (C ; inférieures à 150 Ω .m) se distinguent de zones plus

résistantes (R ; supérieures à 150 Ω .m). Les sections de résistivité électrique permettent d'étayer ce constat et d'estimer l'extension latérale de la géométrie et de la profondeur du toit du substrat calcaire. Les sections 1 et 2 positionnées en travers des enceintes externes et médianes (E1 et E2) forment un transect de 170 m de long orientées WNW-ESE (AS-Figure 2 et 3). Ce transect montre un milieu plus conducteur (AS-Figure 4, MC1, inférieure à 150 Ω .m) correspondant au sol développé sur le substrat calcaire qui est associé à un milieu plus résistant (MC2, supérieure à 200 Ω .m). L'épaisseur de sol (MC1) est très irrégulière avec une puissance de quelques dizaines de centimètres sur l'ensemble de la section 1 et elle est très importante localement (plus de 0,5 m) au niveau de deux dépressions visibles sur la section 2. Une dépression est localisée au niveau de l'enceinte médiane (position 28 et 42 m de la section 2) et l'autre correspond à la zone plus conductrice C1 (position 58 et 70 m sur la section 2) identifiée au SE des cartes électriques (AS-Figure 3). Cette morphologie traduit une dépression orientée NE-SW dans le substrat calcaire (C1) avec un sol plus développé que sur ces bordures est et ouest (AS-Figure 4, section 2) où le calcaire est quasi-affleurant (AS-Figure 3, R1 et R2).

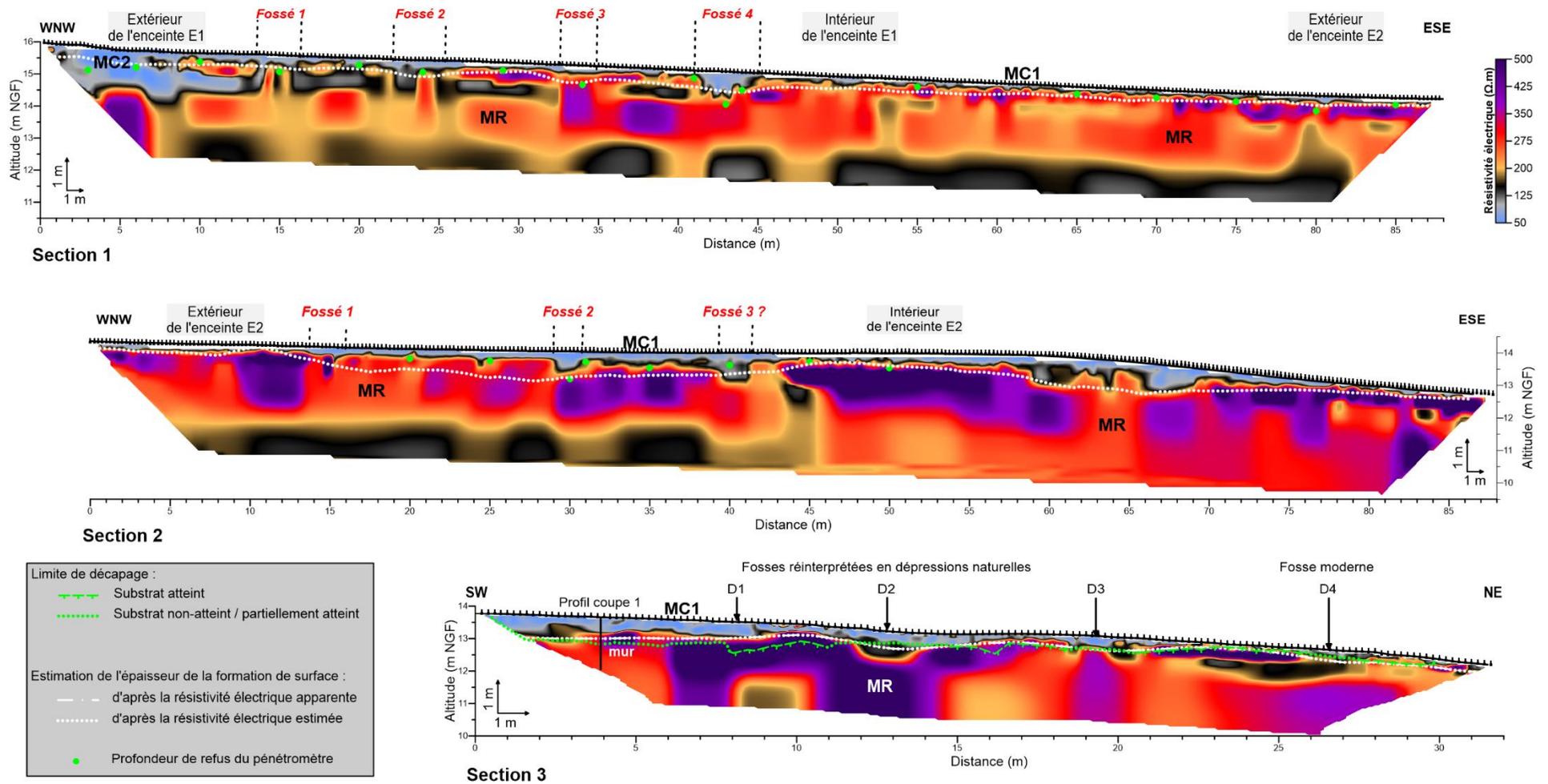
Les fossés néolithiques, identifiés sur la carte des anomalies magnétiques (AS-Figure 2), apparaissent comme des structures plus conductrices (AS-Figure 3, valeurs comprises entre 50 et 150 Ω .m) avec un encaissant correspondant à la zone plus résistante R2 (substrat calcaire) pour ceux de l'enceinte médiane. Pour les fossés de l'enceinte externe, le contraste est moins marqué avec l'encaissant qui possède des résistivités apparentes entre 125 et 150 Ω .m (C2). Sur les sections électriques 1 et 2 (AS-Figure 4), le fossé 4 de l'enceinte externe et le fossé 2, voire le 3, de l'enceinte médiane (AS-Figure 2, E1 et E2) sont des creusements dans le substrat avec un comblement proche de la signature électrique du sol (AS-Figure 4, MC1). Les autres fossés ont un faible contraste avec le substrat. Leurs complements correspondent probablement à des blocs calcaires (même signature électrique que le substrat) comme observé sur d'autres enceintes néolithiques fouillées dans la région (Laporte *et al.*, 2009 ; Ard *et al.*, 2015). Pour l'étude d'un site à enceinte fossoyée, les cartes et les sections électriques apportent des informations complémentaires à la carte magnétique sur la morphologie et la nature du comblement des fossés.



AS-Figure 3 : Cartes de la résistivité électrique apparente effectuées sur différentes parties du site et superposées à un MNE à haute résolution généré par photogrammétrie (imagerie par drone).

AS-Figure 3: Maps of apparent electrical resistivity carried out on different parts of the site and overlaid to a high-resolution elevation digital model created by photogrammetry (drone imaging).

Cette complémentarité s'illustre aussi sur l'anomalie magnétique G au nord du site (AS-Figure 2). Elle est associée à une structure résistante (AS-Figure 3, R3) et aussi à un replat (isohypse 14 m NGF). De part ces deux particularités, cette structure peut être attribuée à un amas calcaire ou à une remontée très locale du substrat. Sur la carte magnétique (AS-Figure 2), les fossés de la première enceinte (E1) épousent la morphologie de cette structure. Ces différentes observations sont des arguments en faveur de la contemporanéité des structures imagées.



AS-Figure 4 : Sections de résistivité électrique réalisées sur le site du Pontet. Les sections 1 et 2 ont été réalisées avec un écartement inter-électrodes de 0,25 m et possèdent une exagération verticale d'ordre 2 par rapport à la distance. La section 3 a été effectuée avec un écartement inter-électrodes de 0,2 m.

AS-Figure 4: Electrical resistivity sections realised on the site of Le Pontet. Sections 1 and 2 have been produced with an electrode spacing of 0,25 m and have a vertical exaggeration of order 2 with respect to the distance. The section 3 has been produced with an electrode spacing of 0,2 m.

Le sondage archéologique se focalise sur un alignement de quatre anomalies magnétiques circulaires interprétées comme des fosses de fonction indéterminée (AS-Figure 2). Le sondage est positionné sur la transition entre la zone conductrice C1 et résistante R1 (AS-Figure 3). Sur la section 3, positionnée en travers des quatre supposés fosses, traduit une épaisseur de sol variable et plus importante dans la partie SW du sondage. Cette morphologie est cohérente avec la dépression identifiée sur la section 2 (AS-Figure 4) et la zone plus conductrice C1 (AS-Figure 3). La section 3 montre que les fosses sont creusées dans le substrat calcaire et possèdent des morphologies variées (AS-Figure 4). Leurs comblements apparaissent avec des gammes de résistivités proches de celle du sol. L'apport principal de cette section est qu'elle permet d'obtenir une idée de la profondeur d'apparition des structures. En amont de la fouille, la carte et la section électrique apportent une estimation du profil de creusement. Cette méthodologie croisant les différentes informations fournies par les prospections géophysiques permet d'anticiper une stratégie de fouille adaptée ainsi que le temps de fouille à prévoir.

4.2 Sondage archéologique : stratigraphie et structure mises au jour

Sur l'orthophotographie (photogrammétrie par drone) du sondage archéologique (AS-Figure 5a), le substrat est indiqué par une trame en pointillés blancs. Elle correspond au calcaire blanc avec un faciès crayeux du Turonien inférieur (Bourgueil et *al.*, 1972). Il présente une très forte irrégularité avec des diaclases et de nombreuses anfractuosités. Sur les zones où le substrat est partiellement atteint, une grande densité compacte de cailloutis et de blocs calcaires blancs correspond probablement un état altéré du calcaire. L'épaisseur de sol a été mesurée sur les limites de l'emprise de la fouille. Il correspond à la hauteur entre la surface et le substrat (le faciès d'altération est considéré comme appartenant au substrat). L'épaisseur du sol s'est révélée plus importante dans la partie sud de l'emprise (pouvant atteindre 1 m de puissance) qu'au nord où le substrat est quasi-affleurant (moins de 0,2 m sous la surface). Deux coupes stratigraphiques (coupe 1 et coupe 2) ont été relevés en bordure sud du décapage. Une même stratigraphie constituée de quatre US (Unité Stratigraphique) a été observée :

- US 1 : horizon humifère superficiel (labour) d'environ 0,2 m d'épaisseur ;
- US 2 : niveau limono-argileux marron contenant essentiellement du mobilier moderne mélangé à des vestiges néolithiques. Son épaisseur importante sur les

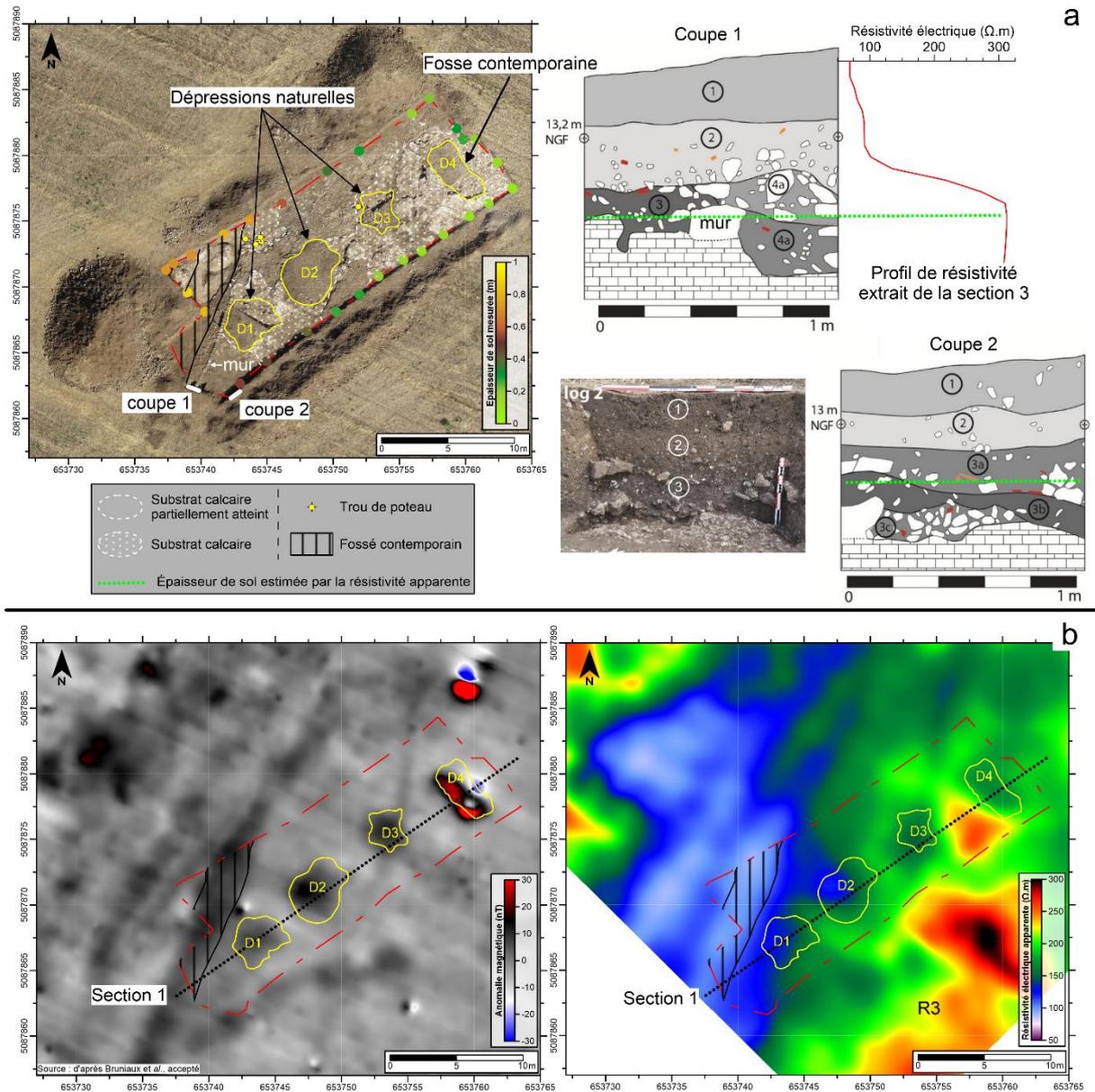
coupes est liée à la présence d'un chemin récent (hachures noires : visible sur les clichés aériens de 1950) ;

- US 3 : niveau limono-argileux noir comprenant des blocs calcaires. Il est très riche en vestiges néolithiques (céramique, os, silex, coquillage). Cette US correspond à un niveau d'occupation néolithique. Sur la coupe 1, ce niveau intègre un alignement de blocs calcaires (mur). Dans la coupe 2, la base de ce niveau est mélangée avec un faciès d'altération du substrat calcaire (US 3b et 3c) ;
- US 4 : uniquement présent sur la coupe 1 et analogue à l'US 3. Ce niveau est identifié comme étant un probable épisode d'effondrement de l'alignement de blocs calcaires (mur).

La découverte d'un niveau d'occupation néolithique en place (US 3) est relativement rare, d'autant plus à l'intérieur d'une enceinte située sur un promontoire, où le substrat affleure traditionnellement sous le labour. L'extension de ce niveau couvre toute la partie sud du sondage et l'est de la structure D1 (AS-Figure 5a). Sa conservation dans ce secteur est liée à son recouvrement par les US 1 et 2 qui pourraient être associées aux horizons A et B d'un même sol. Ces deux horizons sont regroupés sous l'entité de formation de surface (FS : US 1 et 2).

Les céramiques présentes dans ce niveau d'occupation sont l'apanage de la culture peu-richard maritime du Néolithique récent II, datée entre 3350 et 2900 avant J.-C. (Ard, 2014). À la fouille, les supposées fosses se sont révélées ne pas être de telles structures. La structure D4 (AS-Figure 5a) est une fosse dépotoir moderne (présence d'objets métalliques, charbons et tuiles). Les structures D1 à D3 sont des dépressions naturelles peu profonde (anfractuosités) dans le substrat calcaire. Elles sont en parties comblées par le niveau d'occupation néolithique (US 3, coupe 1 et 2). La base de ces dépressions est associée à un dépôt d'altération du substrat calcaire similaire aux US 3b et 3c (coupe 2). Plusieurs trous de poteau d'une trentaine de centimètres de diamètre ont été découverts. La nature de la structure qu'ils supportaient n'a pas pu être déterminée. L'alignement de blocs calcaires d'orientation NE-SW mis au jour lors du décapage (coupe 1) repose sur le substrat préalablement décapé par les constructeurs. L'étude stratigraphique (coupe 1) et le mobilier retrouvé en contact de cet alignement attestent qu'il

s'agit de la base d'un parement néolithique en pierres sèches, destiné à maintenir une terrasse. Celle-ci est aménagée sur une marche du substrat contre laquelle s'appuient les blocs calcaires. Comme pour le niveau d'occupation néolithique (US 3), cette découverte est exceptionnelle pour la région.



AS-Figure 5 : Résultats du sondage archéologique et confrontation avec la géophysique. (a) Orthophotographie interprétée de l'ouverture avec deux coupes stratigraphiques et un cliché de la stratigraphie locale. Le coupe 1 est confronté à un profil de résistivité électrique issu de la section 3. (b) Cartes des anomalies magnétiques réduites aux pôles et de résistivité apparente superposées aux relevés des structures identifiées.

AS-Figure 5: Archaeological excavation results and confrontation with the geophysics. (a) Interpreted orthophotography of the excavation with two stratigraphic cross-sections and local stratigraphic image. The cross-section 1 is confronted to electrical resistivity profile from the section 3. (b) Maps of the magnetic anomalies and apparent resistivity superimposed with the plot of identified structures.

5 ESTIMATION DE L'ÉPAISSEUR DE SOL : DÉTERMINATION DU POTENTIEL DE CONSERVATION DU NIVEAU D'OCCUPATION NÉOLITHIQUE

5.1 Confrontation entre le sondage archéologique et la géophysique

Les sols développés sur un substrat calcaire sont généralement plus magnétiques que leur roche mère. Cette différenciation a pour origine un enrichissement en minéraux magnétiques néoformés dans le sol par l'action de la pédogénèse et du feu (Le Borgne, 1960, 1965 ; Maher, 1998 ; Fassbinder et *al.*, 1990). Sur les dépressions naturelles (AS-Figure 5b ; D1 à D3), les anomalies magnétiques possèdent un signal plus intense que le sol « naturel ». La présence du niveau d'occupation néolithique peut expliquer l'intensité plus élevée du signal magnétique dans ces dépressions et dans la partie sud du sondage. Ceci pourrait être induit par la présence abondante de tessons. De plus, les sols soumis à une anthropisation acquièrent généralement une susceptibilité magnétique plus élevée (Tite et Mullins, 1971). Cependant, l'augmentation de la capacité d'aimantation des sols dépend aussi des conditions pédoclimatiques lors de la formation du sol archéologique et durant son enfouissement. Ces conditions ne sont malheureusement pas connues et il est donc nécessaire de nuancer le lien direct entre le niveau d'occupation et le signal magnétique mesuré sur la carte. Il en va de même pour la partie plus nord du sondage sur la carte magnétique (AS-Figure 3) car un rapprochement entre le signal magnétique bruité et la probable présence du niveau archéologique est tentante. Néanmoins, des investigations plus poussées sont nécessaires pour déterminer l'influence du niveau d'occupation sur l'intensité mesurée sur la carte magnétique.

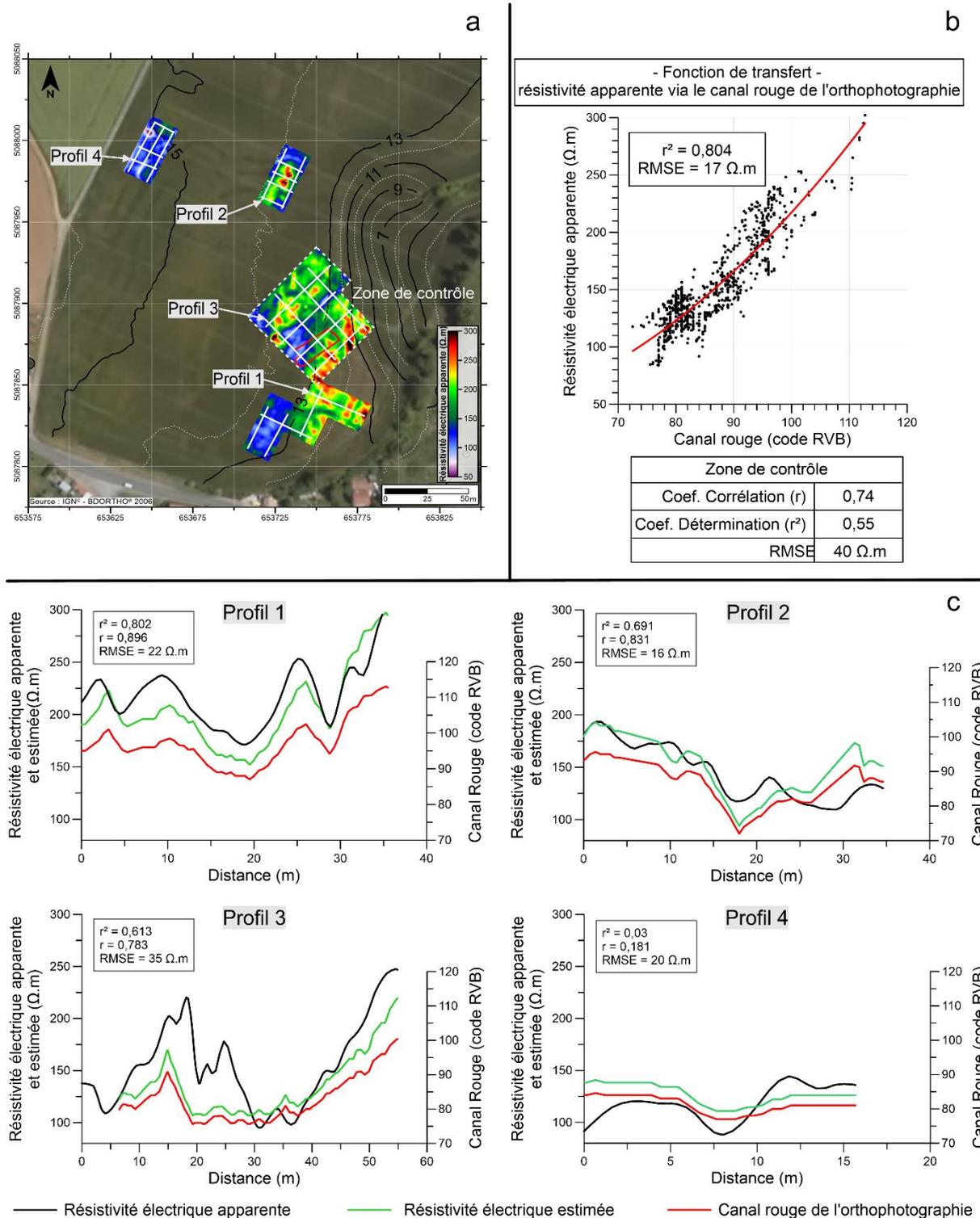
Les petites structures, comme les trous de poteau et l'aménagement en pierres sèches, ne sont pas repérées (AS-Figure 5b). Elles sont enfouies sous une épaisseur de sol trop importante (entre 0,75 et 1 m) au regard de leurs faibles dimensions. Néanmoins, le mur néolithique est reconnaissable sur la section 3 (AS-Figure 4) mais n'a été interprété comme tel qu'après la fouille.

Le milieu électrique MC1 sur la section 3 ne correspond pas exactement à l'ensemble du sol recouvrant le substrat (AS-Figure 4). Sur le profil électrique extrait de cette section en parallèle de la coupe 1 (AS-Figure 5a), la partie plus conductrice correspond à la formation de surface (US 1 et 2) développée au-dessus du niveau d'occupation néolithique (US 3). L'US 3 est associée à la forte augmentation (d'un facteur 3) de la résistivité. Les plus fortes valeurs correspondent au substrat, à son faciès d'altération (US 3b/3c quand il est mélangé avec le niveau d'occupation, coupe 2) et au niveau d'effondrement du mur (US 4). Ces deux derniers possèdent une signature électrique proche du substrat (nombreux blocs calcaires, photo coupe 2). De ce fait, la FS est assimilable au milieu MC1 (AS-Figure 4). Cette FS et le niveau d'occupation (US 3, log 1, et US 3a, log 2) correspondent à l'entité « sol » recouvrant le substrat et ses faciès d'altération (US 3b/3c, coupe 2).

Sur la carte électrique (AS-Figure 5b), l'accroissement de la résistivité apparente vers le SW est cohérent avec les épaisseurs de sol mesurées (AS-Figure 5a). La résistivité apparente est donc le paramètre à exploiter pour modéliser la variation spatiale de l'épaisseur de sol recouvrant le substrat. La détermination de cette variabilité à l'ensemble du site est effectuée en exploitant l'information contenue dans l'orthophotographie. La modélisation de cette épaisseur sera traduite en un potentiel de conservation du niveau archéologique.

5.2 Extension des cartes de la résistivité électrique apparente à l'ensemble du site

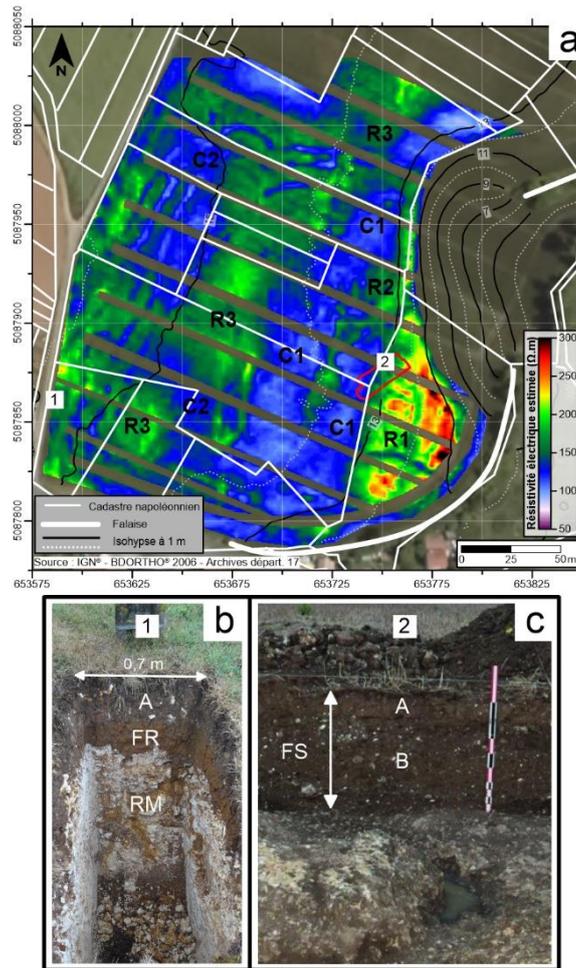
L'orthophotographie de la BD ORTHO® 2006 montre des indices phytographiques liées à une croissance différentielle (AS-Figure 1b). La partie SE du site présente une zone avec des indices phytographiques négatifs (zone plus blanche) et plus à l'ouest des indices positifs (zone plus verte). Par comparaison avec les cartes de résistivité, les indices négatifs sont associés aux parties plus résistantes et inversement pour les indices positifs. L'orthophotographie semble être un outil adapté pour extrapoler les cartes de la résistivité apparente à l'ensemble du site. De plus, elle possède une résolution spatiale identique aux cartes électriques (maille de 0,5 m).



AS-Figure 6 : Estimation de la résistivité électrique apparente via l'orthophotographie du site. (a) Cartes de la résistivité apparente et localisation des profils de résistivité et du canal rouge de l'image. (b) Fonction de transfert entre le canal rouge et la résistivité apparente déterminée à partir des profils, excluant ceux de la zone de contrôle. (c) Exemple de relation entre la résistivité apparente et le canal rouge sur quatre profils.

AS-Figure 6: Estimation of the apparent electrical resistivity via the orthophotography of the site. (a) Maps of apparent electrical resistivity and localisation of the profiles of resistivity and picture red band. (b) The transfer function between red band and apparent resistivity determined from the profiles, without those of the control area. (c) Example of relationship between apparent resistivity and red band on four profiles.

Cette corrélation entre la résistivité/conductivité électrique et la signature spectrale de la végétation a été démontrée et exploitée dans des études environnementales pour la détection de paléochenaux et la cartographie des sols (Camus et *al.*, 2011 ; Rudolph et *al.*, 2015). L'exploitation des images aériennes ou issues de la télédétection offre un changement d'échelle pour extrapoler les résultats des prospections géophysiques aux zones non couvertes par ces investigations. La conversion d'un pixel de l'image en résistivité/conductivité électrique passe par une fonction de transfert définie soit à partir de plusieurs bandes spectrales (Camus et *al.*, 2011), soit via des indices de végétation calculés à partir des canaux rouge et infrarouge (Rudolph et *al.*, 2015). Pour cette étude, l'orthophotographie est décomposée selon ces trois canaux RVB pour extraire le canal rouge de l'image car il présente la meilleure corrélation avec la résistivité électrique apparente. Des profils sont extraits des cartes électriques afin de déterminer la relation entre la résistivité apparente et le canal rouge (AS-Figure 6a). Les tracés des engins agricoles (lignes blanches orientée NW-SE) ne sont pas pris en compte car ils n'ont pas d'équivalence sur les cartes électriques. Il en est de même pour les versants de la paléo-falaise (isohypse 11 m) : les sols sur les formations de colluvionnement ont une évolution pédologique différente de ceux présents sur le plateau. La fonction de transfert entre la résistivité apparente et le canal rouge est illustrée sur la AS-Figure 6b. Ce graphe révèle que l'accroissement générale des résistivités apparentes correspond à une augmentation de la valeur du canal rouge. Pour vérifier cette relation, les profils de la carte électrique de la zone de fouille servent à estimer l'erreur moyenne RMSE (Root Mean Square Error) entre la résistivité électrique apparente et la résistivité calculée. L'erreur moyenne est relativement élevée (40 Ω .m). De ce fait, la résistivité calculée doit être considérée comme une estimation de la résistivité électrique apparente.



AS-Figure 7 : (a) Carte de la résistivité électrique estimée du site et localisation de la coupe stratigraphique nord de la fouille et de la tranchée de réseau. (b) Photographie de la tranchée : horizon A, horizon de décarbonatation (FR : formation résiduelle) et substrat calcaire (RM : roche mère). (c) Photographie de la coupe nord : formation de surface (FS) composée de l'horizon A et B reposant sur le substrat.

AS-Figure 7: (a) Map of estimated electrical resistivity of the site and localisation of the north stratigraphic cross-section of the excavation and the network trench. (b) trench picture: horizon A, decarbonation horizon (FR: residual formation) and limestone substratum (RM: bedrock). (c) north cross-section picture: surface formation (FS) composed by the horizon A and B covering the substratum.

Sur la AS-Figure 6c, quatre profils permettent de visualiser la corrélation entre le canal rouge et la résistivité apparente. Les deux profils 1 et 2 présentent une bonne corrélation. Néanmoins, sur le profil 1, la résistivité estimée est globalement sous-évaluée. Sur le profil 3, la résistivité estimée présente des biais (distance 20 et 30 m) car de fortes variations de la résistivité apparente ne se corrèlent pas avec le canal rouge. Globalement, les fortes variations locales de la résistivité apparente (valeurs extrêmes) n'ont pas d'équivalence sur l'orthophotographie. Elles sont associées à des structures archéologiques, comme l'anomalie G (AS-Figure 2 et 3), ou à des hétérogénéités très locales du substrat. Sur le profil 4 (AS-Figure 6c), recoupant un fossé de l'enceinte externe (AS-Figure 6a), le canal rouge présente très peu de variation contrairement à la résistivité apparente. Au niveau des zones les plus conductrices,

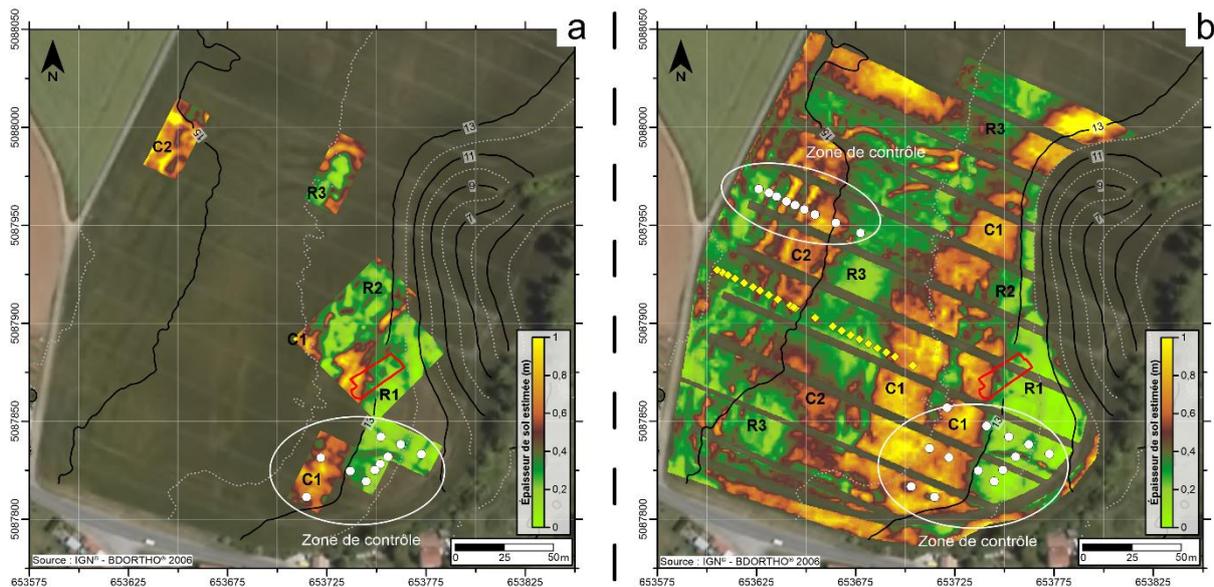
comme sur des fossés, l'intensité du rouge atteint un seuil (entre 80 et 70). Les variations de couleur sur l'orthophotographie sont liées à la croissance du blé. Or le rendement du blé est optimale pour une épaisseur de sol comprise entre 0,6 et 1,2 m (Power et *al.*, 1981). De ce fait, la croissance du blé est moins soumise au stress lié à l'épaisseur de sol sur des creusements. La couleur de l'image présente moins de contraste que sur les zones où la plante subit un stress plus important.

La carte de résistivité électrique estimée de l'ensemble du site est une extension des cinq zones identifiées sur les cartes de résistivité apparente (AS-Figure 3 et 7a, C1, C2, R1, R2 et R3). La grande zone plus conductrice C1 est bordée par deux grands ensembles plus résistants R1 et R3 avec la zone R2 localisée au centre de C1. Les deux zones plus conductrices C2, de par leur forme en angle droit, pourraient être associées à des parcelles anciens (des limites cadastrales napoléoniennes sont renseignées à ces emplacements).

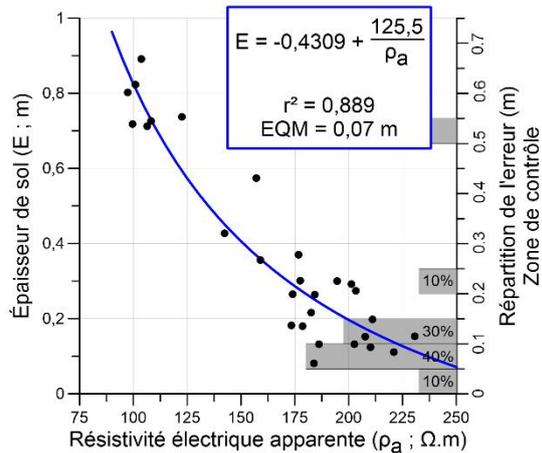
D'après une tranchée de réseau réalisée en bordure du site (AS-Figure 7b ; AS-Figure 7a, 1), la stratigraphie est différente de celle observée sur la fouille (AS-Figure 7c ; AS-Figure 7a, 2). En effet, la tranchée de réseau (AS-Figure 7a, 1) présente un horizon de décarbonatation de couleur brun-ocre (AS-Figure 7b, horizon FR). Cette altération météorique du substrat calcaire se forme par la dissolution des carbonates en milieu basique et l'accumulation des résidus insolubles du calcaire en surface, principalement composés d'argile (Dewolf et Bourrié, 2008). Les argiles étant des matériaux conducteurs, cet horizon correspond probablement au milieu plus conducteur (AS-Figure 4, MC2, section 1), présent à l'ouest de la section électrique. Ce formation résiduelle semble n'être présente qu'en bordure du site (possible présence jusqu'au fossé 2 de l'enceinte externe E1). La présence d'un niveau de décarbonatation uniquement en bordure d'une enceinte néolithique a aussi été observée sur le site de Bellevue à Chenommet (Charente ; Ard et *al.*, 2015). La relation entre l'absence d'horizon de décarbonatation à l'intérieur de l'enceinte et l'occupation du site au Néolithique semble présenter un lien. Cet horizon aurait pu être décapé lors de l'implantation sur le site et l'occupation humaine se serait fait directement sur le substrat. Son absence pourrait aussi résulter d'une érosion naturelle et il serait alors présent que sur les hauteurs et non sur les versants.

5.3 Estimation de l'épaisseur de sol recouvrant le substrat

La fouille montre que la puissance minimale de la FS nécessaire pour la conservation du niveau archéologique est d'une trentaine de centimètres, les protégeant principalement du labour, soit une épaisseur de sol d'au moins 0,4 m. En supposant que la mesure de la résistivité apparente n'est influencée que par deux milieux électriques distincts : le substrat calcaire résistant et le sol plus conducteur (supposé homogène pour une profondeur d'intégration d'une cinquantaine de centimètres). À partir des épaisseurs de sol mesurées sur l'emprise de la fouille et des résistivités apparentes, une fonction de transfert permet de modéliser la puissance de FS/sol via la résistivité apparente (AS-Figure 8a). Pour valider ce modèle, des essais pénétrométriques ont été réalisés dans la partie sud du site pour obtenir la profondeur d'apparition du toit du substrat (profondeur de refus). L'erreur du modèle est calculée via une erreur quadratique médiane (EQM). En effet, la profondeur du toit du substrat fournit par les essais pénétrométriques est ponctuelle et présente une très forte variabilité liée à la présence de blocs calcaires et d'anfractuosités (Lenoble et Martinaud, 2003). De plus, le volume d'intégration de la mesure pénétrométrique (quelques centimètres autour de la pointe ; Breysse et *al.*, 2002) est très faible comparé à celui de la résistivité apparente. Pour limiter l'influence des extrêmes, la médiane est privilégiée à la moyenne pour le calcul de l'erreur. De plus, la fouille montre que dans les parties sous plus de cinquante centimètres de sol, la concentration en blocs calcaires est importante (AS-Figure 5a, photo log 2). De ce fait, la profondeur de refus des essais pénétrométriques a une très forte probabilité de ne pas indiquer le substrat *sensu-stricto* mais sa couche d'altération. Néanmoins, cette précision est suffisante pour cette étude car l'épaisseur à modéliser est celle du sol, défini comme l'entité de surface recouvrant le substrat ou son faciès d'altération.

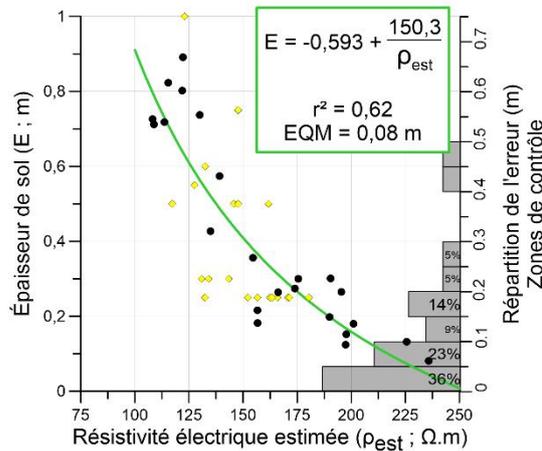


- Fonction de transfert -
modélisation de l'épaisseur de sol via la résistivité apparente



Zone de contrôle	
Coef. Corrélation (r)	0,94
Coef. Détermination (r ²)	0,88
EQM	0,09 m

- Fonction de transfert -
modélisation de l'épaisseur de sol via la résistivité estimée



Zones de contrôle	
Coef. Corrélation (r)	0,67
Coef. Détermination (r ²)	0,45
EQM	0,08 m

AS-Figure 8 : Cartes de l'estimation de l'épaisseur du sol (recouvrant le substrat). (a) Carte de l'épaisseur du sol estimées à partir de la résistivité apparente. La fonction de transfert est calculée à partir des épaisseurs mesurées sur les limites d'emprise de la fouille (●). Les critères de qualité sont déterminés sur la zone de contrôle par confrontation entre l'épaisseur estimée et la profondeur de refus (○). (b) Carte de l'épaisseur de sol générée par de la résistivité estimée. La fonction de transfert est déterminée par les épaisseurs mesurées sur les limites de l'emprise de la fouille (●) et des essais pénétrométriques (◆). Les épaisseurs estimées sont confrontées aux profondeurs de refus (○) sur deux zones de contrôle.

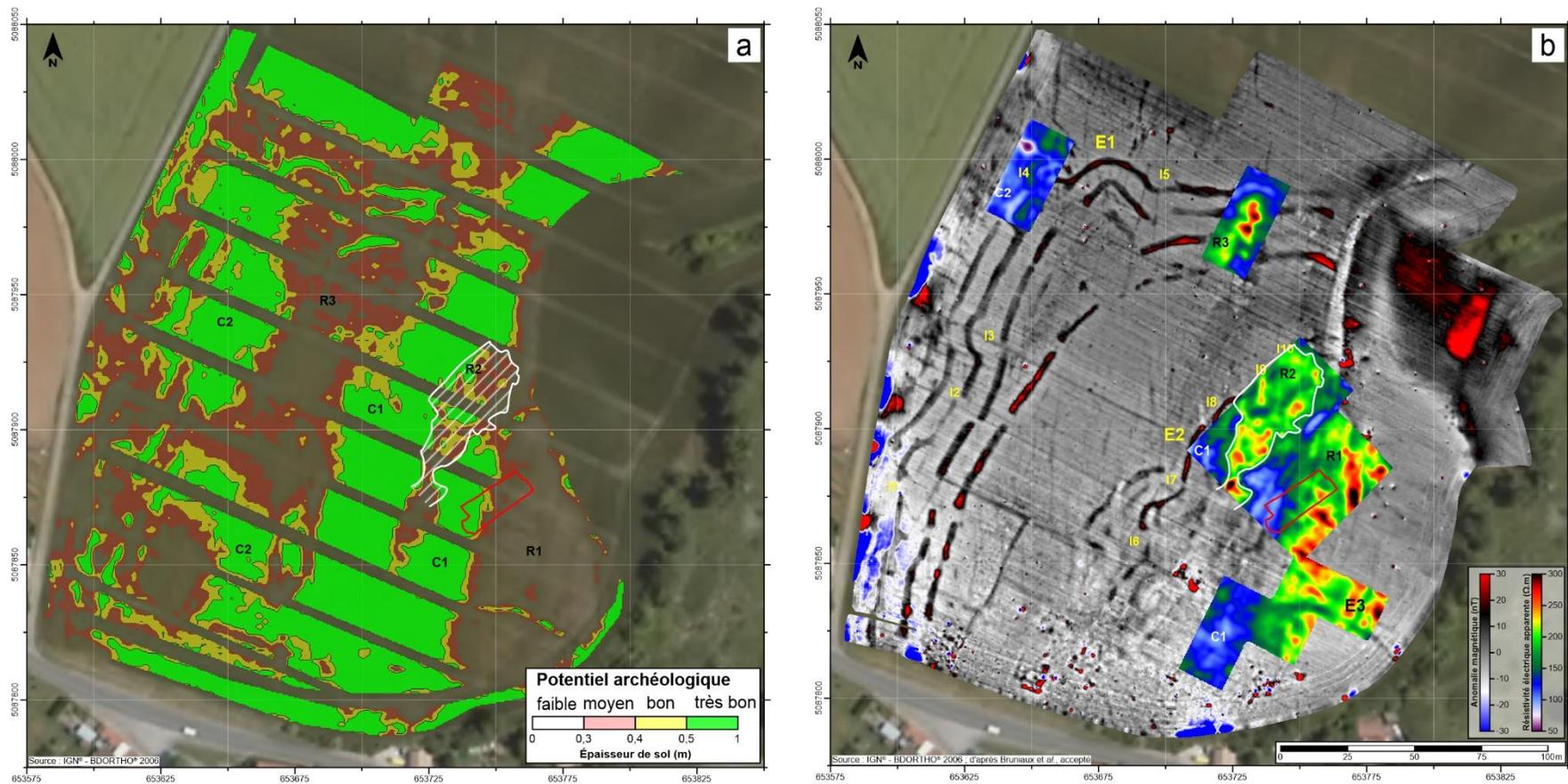
AS-Figure 8 : Maps of the estimation of soil thickness (covering substratum). (a) Map of soil thickness estimated from apparent resistivity. The transfer function is calculated from measured thicknesses on the excavation easement borders (●). Quality criterion are determined on the control area by confrontation between estimated thickness and refusal depth (○). (b) Map of soil thickness generated by the estimated resistivity. The transfer function is determined from measured thicknesses on the excavation easement borders (●) and penetrometer tests (◆). The estimated thicknesses are confronted to refusal depth (○) on two control areas.

L'erreur médiane calculée à partir des profondeurs de refus montre que la carte d'épaisseur du sol est fiable. Sur les coupes 1 et 2 (AS-Figure 5a), l'épaisseur estimée intègre bien le niveau d'occupation néolithique. Dans d'autres contextes, comme des anfractuosités locales (D1 à D3),

l'épaisseur estimée correspond à la FS et ne suit pas la forme de la dépression naturelle (probablement induite par un faible contraste électrique entre la dépression et son encaissant ; AS-Figure 5a). Sur la carte de l'épaisseur de sol (AS-Figure 8a), les zones résistantes R1, R2 et R3 correspondent à un sol d'une vingtaine de centimètres. Les zones conductrices C1 et C2 ont une épaisseur de sol supérieure à 0,5 m, tout comme les fossés néolithiques sauf sur celui de la supposée enceinte interne (AS-Figure 2, E3 ; AS-Figure 8a).

Pour étendre cette démarche à l'ensemble du site, elle est appliquée à la résistivité estimée. Pour déterminer la fonction de transfert, les mesures d'épaisseur de sol sur la fouille et des essais pénétrométriques sont utilisés (en parallèle de la section 1 ; AS-Figure 8b). La forte variabilité de la profondeur de refus et l'erreur sur la résistivité estimée induisent une relation moins fiable que la fonction de transfert de la résistivité apparente vers l'épaisseur de sol (AS-Figure 8a). Néanmoins, les essais pénétrométriques sur les zones de contrôle montrent une erreur médiane (EQM) très acceptable malgré des indices de confiance moyens. Au nord, les profondeurs de refus sont globalement inférieures à la profondeur calculée par la résistivité estimée (AS-Figure 8b). Cette différence semble être associée la présence du niveau de décarbonatation qui augmenterait la résistivité du sol induisant une surestimation de son épaisseur modélisée.

Sur la section électrique 3 (AS-Figure 4), le profil d'épaisseur de sol modélisée par la résistivité estimée est identique à celui calculé par la résistivité apparente. Sur les sections 1 et 2, les estimations de la puissance du sol sont cohérentes avec les profondeurs de refus des essais pénétrométriques. Néanmoins, sur la section 2, les épaisseurs de sol semblent être surestimées au niveau de la dépression C1 (position 12,5 à 45 m) par rapport à celle identifiée sur cette section (position 28 à 42 m). Les raisons de cet écart sont difficiles à établir (variation locale de la lithologie du substrat ou nature du comblement différente et propice à une meilleure croissance du blé ?).



AS-Figure 9 : : Estimation du potentiel de conservation du niveau archéologique du site néolithique du Pontet. (a) Carte du potentiel de conservation du niveau d'occupation néolithique du site déterminée à partir des épaisseurs de sol. Les qualificatifs du potentiel archéologique tiennent compte de l'erreur sur les épaisseurs estimées du sol. « Faible » : épaisseur insuffisante pour conserver le niveau d'occupation néolithique (ne signifie pas l'absence de vestige). « Moyen » : épaisseur quasi-suffisante pour abriter le niveau d'occupation (forte influence de l'erreur de médiane). « Bon » : épaisseur suffisante pour abriter le niveau d'occupation et faible influence de l'erreur médiane. « Très bon » : épaisseur largement suffisante pour abriter le niveau d'occupation. (b) Carte des anomalies magnétiques réduite aux pôles du site superposée aux cartes de la résistivité apparente.

AS-Figure 9 : Potential estimation of archaeological level conservation of the Neolithic of Le Pontet. (a) map of the potential of the Neolithic occupation level conservation of the site determined from soil thicknesses. The archaeological potential qualifying taking account of the error on the estimated soil thicknesses. "Low": not enough soil thickness to preserve the Neolithic occupation level (do not signify vestige lack). "Not bad": quasi-sufficient soil thickness to preserve the occupation level (strong influence of median error). "Good": sufficient soil thickness to preserve the occupation level and low influence of median error. "Very good": largely sufficient soil thickness to preserve the occupation level. (b) Map of magnetic anomalies with reduction to the pole of the site overlaid to the apparent resistivity maps.

La grande zone conductrice C1 sur la carte de résistivité estimée (AS-Figure 7) est une grande dépression dans le substrat calcaire (AS-Figure 8b, C1), probablement surestimée dans sa partie ouest. Dans sa partie sud, les bordures présentent des directions NEN-WSW à NE-SW, proche de celles des diaclases visibles sur la carte magnétique (AS-Figure 2) et de la paléo-falaise. L'aménagement néolithique en pierres sèches possède aussi une direction semblable aux diaclases et il s'appuie sur une marche du substrat calcaire. Ces deux observations semblent indiquer que cette grande dépression pourrait trouver son origine dans des phénomènes de microtectonique.

5.4 Estimation du potentiel de conservation du niveau d'occupation néolithique

L'étude stratigraphique réalisée lors de la fouille à partir des coupes 1 et 2 (AS-Figure 5a) montre que le niveau d'occupation néolithique n'est conservé que sous une quarantaine de centimètre d'épaisseur de sol (ou une épaisseur de FS supérieure à une trentaine de centimètres). À partir de ces informations, la carte d'épaisseur de sol de la AS-Figure 8b est convertie en une carte du potentiel de conservation du niveau archéologique (AS-Figure 9a). Ce potentiel est une interprétation qualitative de l'épaisseur du sol en fonction des informations archéologiques du sondage. Les zones de la carte présentant une épaisseur de sol estimée inférieure à 0,3 m sont considérées avec un potentiel « faible », supposées soumises au labour. Néanmoins, le potentiel de conservation ne concerne que la présence du niveau néolithique. Toutefois, un potentiel « faible » ne signifie pas une absence de vestiges car de petites structures en creux, comme des trous de poteau de faible diamètre peuvent être présentes mais non détectées par les outils géophysiques. Sur les cartes de résistivité (AS-Figure 9b), le potentiel « faible » correspond aux zones très résistantes (R1 à R3).

Entre 0,3 et 0,4 m d'épaisseur (AS-Figure 9a), ces zones sont dites à potentiel « moyen » car elles présentent une épaisseur de sol suffisante pour abriter le niveau d'occupation néolithique (US 3). Néanmoins, l'erreur médiane d'une dizaine de centimètre ne garantit pas une épaisseur suffisante pour la bonne conservation du niveau archéologique. Ces zones correspondent en partie à R2 et R3 sur les cartes électriques (AS-Figure 9b). Le potentiel qualifié de « bon » est associé à des épaisseurs de 0,4 à 0,5 m (AS-Figure 9a). Cette gamme est suffisante pour protéger la couche archéologique du labour, même en tenant compte de l'erreur. Sur les coupes 1 et 2, la puissance du sol est du même ordre de

grandeur (AS-Figure 5a). Le potentiel « très bon » correspond aux zones avec des épaisseurs de sol supérieures à 0,5 m (AS-Figure 9a). Les potentiels « bon » et « très bon » correspondent ainsi aux zones plus conductrices (C1 et C2) associées à des grandes dépressions dans le substrat calcaire (C1 ; AS-Figure 8b).

Le potentiel de conservation du niveau archéologique permet ainsi de localiser les parties du site où le niveau d'occupation néolithique est probablement préservé. Néanmoins, le sondage archéologique montre que ce niveau peut aussi contenir des structures néolithiques, comme l'aménagement en pierres sèche (AS-Figure 5a). Cependant, la carte du potentiel archéologique ainsi définie ne permet pas de conclure à la présence des structures mais uniquement au niveau d'occupation. Il correspond donc à un outil à employer en complément de la carte magnétique. En effet, les zones à fort potentiel présentent une épaisseur de sol suffisante mais elles peuvent aussi être associées à la présence, par exemple, de fossés récents comme celui identifié lors du sondage et visible sur la carte magnétique (AS-Figure 5b). Ce croisement avec la carte magnétique permet de mieux interpréter ce potentiel. C'est donc un outil d'aide à la compréhension du site en identifiant les zones susceptibles d'accueillir un niveau d'occupation. Le croisement entre la carte du potentiel de conservation du niveau archéologique et la carte magnétique permet ainsi de mieux cibler les zones qui pourront apporter des informations intéressantes à la compréhension du site lors de futures investigations archéologiques.

6 DISCUSSIONS

L'estimation du potentiel de conservation du niveau archéologique sur le site du Pontet est réalisée en plusieurs étapes à partir de différentes sources d'information. Chaque source possède ses approximations qui sont de potentiels sources d'erreur et de biais dans le cheminement du protocole. Certaines d'entre-elles ont été énoncées dans les parties précédentes. Il est nécessaire de les discuter.

L'une des étapes importantes de cette étude est l'extension des cartes électriques à l'ensemble du site via l'orthophotographie. La relation entre le canal rouge de l'image et la résistivité apparente n'est pas optimale et ceci est liée à différents facteurs. L'un des facteurs est associé à des zones avec des valeurs extrêmes de la résistivité apparente qui n'ont pas d'analogie avec le canal rouge. Néanmoins,

ces zones sont très localisées et sont associées principalement à des structures archéologiques (AS-Figure 3, structure G) ou à des variations très locales du calcaire. Elles ont donc peu d'influence dans la suite des étapes du protocole.

Par rapport aux cartes électriques (AS-Figure 3), la résistivité estimée est globalement sous-évaluée (AS-Figure 6), principalement sur les zones C1 et R2. Pour la modélisation de l'épaisseur de sol, cette sous-évaluation n'a pas vraiment d'influence sur les zones où la résistivité estimée suit la tendance générale de la résistivité apparente (AS-Figure 6c, profil 1 et 2). En effet, la modélisation de l'épaisseur de sol par la résistivité estimée est effectuée indépendamment de la résistivité apparente (AS-Figure 8). Cependant, pour les zones où la résistivité estimée est sous-évaluée et ne suit pas la tendance de la résistivité apparente (AS-Figure 6c, profil 3), la conséquence est une épaisseur de sol surestimée comme pour la zone R2 (AS-Figure 8b) par rapport à l'épaisseur estimée par la résistivité apparente (AS-Figure 8a). Néanmoins, par comparaison avec les cartes électriques (AS-Figure 9b), il est possible de discriminer la zone R2 qui possède un potentiel de conservation du sol archéologique surévalué (AS-Figure 9a, hachures blanches). Elle correspond plutôt à un potentiel « moyen » à « faible ».

Un biais sur l'estimation de la résistivité apparente est l'hétérogénéité de la nature du substrat. La séquence stratigraphique turonienne, dans la région, est marno-calcaire. Néanmoins, le niveau de marne n'est présent qu'à la base de la séquence (Bourgueil et *al.*, 1972). Le séquence du Turonien inférieur et moyen sus-jacent correspondent à une formation calcaire homogène ne présentant pas d'alternance avec des faciès plus marneux (Platel, 1996). De plus, les formations sont quasiment tabulaires et suivent les isohypses d'altitude. Une prospection électromagnétique à large maille réalisée à d'un conductivimètre EM 31 (*Geonics*), avec une profondeur d'investigation maximale de l'ordre de 6 m, montre que le plateau calcaire au site est très homogène. Le niveau de marne du Turonien inférieur a pu être localisé et suit l'isohypse 7 m NGF, bien en dessous du site qui est à une altitude comprise entre 12 et 16 m NGF. Le possible biais lié à la nature du substrat est donc écarté.

Les zones conductrices C2 (avec une forme angulaire) sur la carte de la résistivité estimée, qui sont probablement liées à d'anciens parcellaires (AS-Figure 6a), sont identifiées avec un potentiel « très bon » de conservation du niveau archéologique. La présence de parcellaire pourrait indiquer des

remaniements du sol et invalider le qualificatif de « très bon ». Néanmoins, sur la carte magnétique, les fossés de l'enceinte externe et les *pincés de crabe* de l'entrée I4 ne présentent pas de stigmate d'un quelconque remaniement (AS-Figure 9b). De ce fait, l'indication du parcellaire ne semble pas être un motif pour dévaluer le potentiel de ces deux zones C2. Au contraire, comme sur le sondage archéologique, la présence d'un chemin moderne à proximité du niveau d'occupation a pu être l'un des acteurs de sa bonne conservation et le protégeant du labour (AS-Figure 5a). Il est fort probable que les anciens parcellaires sur les zones C2 (AS-Figure 9a) jouent le même rôle, rendant la zone C2 au niveau de l'entrée I4 (AS-Figure 9a et 9b) très intéressante.

7 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le protocole mis en place exploite diverses sources d'information à différentes échelles d'observation et résolutions allant du sondage archéologique et de sa stratigraphie locale jusqu'à l'échelle du site. La compilation des données archéologiques, géophysiques, géotechniques et d'imagerie aérienne a permis d'établir une carte du potentiel de conservation du niveau archéologique du site néolithique du Pontet. Cette carte est une interprétation qualitative de l'épaisseur du sol recouvrant le substrat calcaire. Sa puissance conditionne la conservation d'un niveau d'occupation. Sur un site néolithique à enceinte fossoyée de 5 ha, l'estimation de l'épaisseur du sol par la fusion de méthodes géophysiques de surface et d'imagerie aérienne puis suivie de sa conversion en un potentiel de conservation d'une couche archéologique à partir des résultats d'un sondage de 240 m² est novatrice. Ce potentiel archéologique est un outil pour guider les prochaines investigations sur le site. Cette démarche quasiment non-destructrice s'inscrit parfaitement dans une politique de conservation du patrimoine.

L'extension de la carte de l'épaisseur de sol à l'ensemble du site a été possible grâce à une image aérienne prise au moment propice pour observer des indices phytographiques pertinents. Cette méthode est donc dépendante de la saison de la prise vue de la photographie. Cette contrainte pourrait être outrepasser par l'emploi d'un drone qui permettrait d'acquérir une orthophotographie du site avec une meilleure résolution et surtout d'effectuer le survol au meilleur moment en fonction du calendrier des

cultures. De plus, les nouvelles générations de drone possèdent des caméras multi-spectrales. Ceci permettra sûrement d'améliorer la fonction de transfert entre l'imagerie aérienne et la résistivité électrique apparente.

Le site choisi pour tester ce protocole repose sur un sol développé sur un substrat calcaire sur le plateau d'une petite vallée. L'avantage de ces sols est qu'ils sont relativement homogènes. Le système peut donc être simplement modélisé par deux couches. Des tests sur d'autres types de sol comme ceux développés sur des marnes et des roches détritiques ou cristallines permettront de vérifier la validité du protocole et d'élargir son champ d'action. Dans cette optique de validité, le changement de contexte archéologique permettra aussi d'améliorer ce protocole, par exemple en le testant sur des sites présentant des structures bâtis.

Enfin, la présence de l'horizon de décarbonatation à l'extérieur du site mériterait des investigations supplémentaires. En effet, son absence à l'intérieur de deux enceintes néolithiques, Le Pontet à Saint-Nazaire-sur-Charente et Bellevue à Chenommet (Ard *et al.*, 2015a), montre l'intérêt d'une étude pédologique avancée pour comprendre l'évolution de l'occupation de ces enceintes. Cette étude pourrait être réalisée par des fosses pédologiques à l'extérieur du site couplée à une étude du signal magnétique du sol.

8 REMERCIEMENTS

Les auteurs de cet article souhaitent remercier chaleureusement les propriétaires du terrain d'étude qui nous ont donné l'accès libre à leurs parcelles. Un grand merci à l'équipe de fouilleurs bénévoles : Jean-Claude Betreud, Eric Bouchet, Gautier Broux, Jean-Paul Calauzenes, Philippe Duprat, Frédéric Jadeau, Antoine Laurent, Marie Lebreton, Victor Legrand, Thibaut Paulmier, Hervé Porcher, Julien Penicaud, Ludovic Soler, Jean-Louis Tanchoux et Nils Wisser. Nous remercions et félicitons les étudiants de la Licence 3 de Sciences de la Terre de l'Université de La Rochelle pour leurs contributions aux prospections géophysiques. Nous remercions aussi Bastien Millescamps et Nicolas Lachaussée de l'UMR 7266 – LIENSs qui ont dirigé le survol par drone du site et la création du modèle numérique d'élévation à haute résolution du site. Nous tenons aussi à remercier le Service Régional de

l'Archéologie de la DRAC Poitou-Charentes pour son soutien financier et scientifique. Ce travail a été financé par le programme collectif de recherche « Dynamique d'occupation et exploitation du sel dans les golfes charentais, du néolithique à l'Age du Fer ».

9 BIBLIOGRAPHIE

Ard, V., 2012. Occupation, architecture et fonction d'une enceinte fossoyée du Néolithique récent - Apport des fouilles récentes du sites de Bellevue à Chenommet. In CrabeNéo, *Enceintes néolithiques de l'Ouest de la France de la Seine à la Gironde*. Volume XLVIII. Historial de la Vendée, Les Lucs-sur-Boulogne, Septembre, 131–147.

Ard, V., 2014. *Produire et échanger au Néolithique - traditions céramiques entre Loire et Gironde au IVe millénaire avant J.-C.* Editions du Comité des travaux historiques et scientifiques. Paris, France.

Ard, V., Mathé, V., Lévêque, F., Camus, A., 2015. A Comprehensive Magnetic Survey of a Neolithic Causewayed Enclosure in West-central France for the Interpretation of Archaeological Features: Comprehensive Magnetic Survey of a Neolithic Causewayed Enclosure. *Archaeological Prospection*, 22, (1): 21–32.

Ard, V., Weller, O., 2014. Des enceintes qui ne manquent pas de sel. Les vases de « type Champ-Durand » comme témoins d'une activité spécifique aux pourtours des marais poitevin et charentais. In *Enceintes néolithiques de l'Ouest de la France de la Seine à la Gironde, actes du colloque CrabeNéo*. Les Lucs-sur-Boulogne, 19-21 septembre 2012, 371–385.

Bourgueil, B., Moreau, P., Gabet, C., L'Homer, A., Vouve, J., 1972. *Carte géologique de la France à 1/50 000, feuille Rochefort XIV-30 et Notice explicative (658)*.

Breyse, D., Niandou, H., Rodier, X., Galinié, H., Laurent, A., 2002. Le pénétromètre et l'hétérogénéité des sols archéologiques urbains. *Revue Française de Géotechnique*, 100, (3): 43–58.

Bruniaux, G., Mathé, V., Lévêque, F., Camus, A., Ard, V., accepté. Data processing chain to high spatial resolution magnetic survey: application on the Neolithic site of Le Pontet (Charente-Maritime, France). *Archaeological Prospection*.

Burgaud, P., 1937. Un fond de cabane néolithique à la Garenne (Charente-Inférieure). *Bulletin de la Société préhistorique française*, 34, (2): 132–140.

Burnez, C., Louboutin, C., 1999. Les enceintes fossoyées néolithiques : architecture et fonction : l'exemple du Bassin inférieur et moyen de la Charente. *Bulletin de la Société préhistorique française*, 96, (3): 329–352.

Burnez, C., Louboutin, C., Braguier, S., 2001. Les habitats néolithiques ceinturés du Centre-Ouest de la France. In Séminaire du Collège de France, *Communautés villageoises du Proche-Orient à l'Atlantique (8000-2000 avant notre ère)*. Paris, France, 205–220.

Camus, A., Mathé, V., Augereau, B., Kernéis, E., Lévêque, F., Pouget, F., 2011. Intégration de la géophysique et de la télédétection pour la cartographie des sols à haute résolution spatiale : exemple de la reconnaissance de paléochenaux historiques dans les marais charentais. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, (193): 12–26.

- Cosenza, P., Marmet, E., Rejiba, F., Jun Cui, Y., Tabbagh, A., Charlery, Y., 2006. Correlations between geotechnical and electrical data: A case study at Garchy in France. *Journal of Applied Geophysics*, 60, (3–4): 165–178.
- Dahlin, T., Zhou, B., 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical prospecting*, 52, (5): 379–398.
- Dewolf, Y., Bourrié, G., 2008. *Les formations superficielles. Genèse - Typologie - Classification - Paysages et environnements - Ressources et risques*. Ellipses, Paris.
- Doneus, M., Eder-Hinterleitner, A., Neubauer, W., 2001. Archaeological prospection in Austria. In Fourth International Conference on Archaeological Prospection, *Archaeological Prospection*. Vienne, 11–59.
- Faßbinder, J.W.E., Stanjek, H., Hojatollah, V., 1990. Occurrence of magnetic bacteria in soil. *Nature*, 343 : 161–162.
- Gabet, Massaud, J., 1965. Le gisement Peu-Richardien de La Garenne 2, commune de Saint-Hippolyte (Char.-Mar.). *Bulletin de la Société préhistorique française*, 62, (1): 159–196.
- Hangouët, J.-F., Cantou, J.-P., Pausader, M., 2014. L'orthomosaique à échelle départementale : les performances de l'imagerie Pléiades comparées au produit BD ORTHO(r). *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, (208): 19–25.
- Hasek, V., Kovarnik, J., 1999. Aerial and Geophysical Prospection in Archaeological Research of Prehistoric Circular Ditches in Moravia. *Archaeological Prospection*, 6 : 187–209.
- Hénaff, X., Olivet, Y., 2009. Sondages sur le site peu-richardien de la Prise de l'Atelier à la Tremblade (Charente-Maritime). In L. Laporte (dir.). Des premiers paysans aux premiers métallurgistes sur la façade atlantique de la France (3500-2000 av. J.-C.). Association des Publications Chauvinoises - A.P.C., Chauvigny ; 105–110.
- IGN, 2004. BD ORTHO® Version 2. Descriptif de contenu. Institut Géographique National, Saint-Mandé.
- Joussaume, R., 1995. Les enceintes néolithiques du Centre-Ouest de la France. *Groupe vendéen d'études préhistoriques*, (31): 25–31.
- Kalaycı, T., Sarris, A., 2016. Multi-Sensor Geomagnetic Prospection: A Case Study from Neolithic Thessaly, Greece. *Remote Sensing*, 8, (11): 966.
- Kennedy, W.J., Gale, A.S., 2016. Turonian ammonites from northwestern Aquitaine, France. *Cretaceous Research*, 58 : 265–296.
- Křivánek, R., 2006. Magnetometric prospection of various types of large ditched enclosures in Bohemia. *Archaeological Prospection*, 13, (1): 25–43.
- Laporte, L., 2009. Un secteur d'activités manufacturières sur l'habitat néolithique final de Ponthezières à Saint-Georges-d'Oléron (Charente-Maritime). In L. Laporte (dir.). Des premiers paysans aux premiers métallurgistes sur la façade atlantique de la France (3500-2000 av. J.-C.). Association des Publications Chauvinoises - A.P.C., Chauvigny : 111–145.
- Laporte, L., Sellami, F., Bougeant, P., 2009. Architectures et organisation de l'espace - Les sites de la Prise de l'Atelier (Presqu'île d'Avert), de Ponthezières, de La Perroche et de l'Ecuissière (île d'Oléron). In L. Laporte (dir.). Des premiers paysans aux premiers métallurgistes sur la façade atlantique de la France (3500-2000 av. J.-C.). Association des Publications Chauvinoises - A.P.C., Chauvigny : 13–166.

- Laurent, A., 2007. Evaluation du potentiel archéologique du sol en milieu urbain. Thèse de doctorat, Université François Rabelais, Tours, France.
- Le Borgne, E., 1960. Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol et sur celles du schiste et du granite. *Annales de Géophysique*, 16 : 159–196.
- Le Borgne, E., 1965. Les propriétés magnétiques du sol. Application à la prospection des sites archéologiques. *Archaeo-Physika*, 1 : 1–20.
- Lenoble, A., Martinaud, M., 2003. Apports du pénétrromètre à la connaissance d'un site préhistorique. Le cas de l'abri de Diepkloof, Province du Cap, Afrique du Sud. *Revue d'Archéométrie*, (27): 27–36.
- Loke, M.H., 2014. Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. Geotomo software, Malaysia.
- Loke, M.H., Acworth, I., Dahlin, T., 2003. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Exploration Geophysics*, 34, (3): 182–187.
- Loke, M.H., Barker, R.D., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. In 56th EAEG meeting, Volume 44. Vienne, 131–152.
- Lück, E., Eisenreich, M., 1999. Geophysical prospection of archaeological sites in Brandenburg, Germany. *Archaeological Prospection*, 6, (3): 125–133.
- Maher, B.A., 1998. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 137 : 25–54.
- Martinaud, M., 1990. Intérêts du dispositif bipôle C-P en prospection électrique non mécanisée. *Revue d'Archéométrie*, (14): 5–16.
- Martinaud, M., 1997. La pratique de la méthode électrique par une unité de service en prospection archéologique. Choix des quadripôles et exemples de résultats. *Revue d'Archéométrie*, (21): 5–20.
- Martinaud, M., 2005. Prospection géophysique et sites préhistoriques. *Archéologie & sciences des origines*, (308): 26–34.
- Martinaud, M., Baret, C., Gambier, D., Madani, F., Morala, A., Mouillac, L., Royere, J., Sireix, C., 1999. Sur l'intégration de résultats géophysiques avec des résultats de sondages mécaniques ponctuels. *Revue d'Archéométrie*, 23, (1): 33–45.
- Mathé, V., Lévêque, F., Druez, M., Ard, V., 2012. Qu'apporte la prospection géophysique à l'étude d'un champ néolithique ? L'exemple du site de Bellevue à Chenommet (Charente). In 9ème Rencontres Méridionales de Préhistoire récente. Saint-Georges-de-Didonne, 8 October, 135–140
- Moreau, P., Platel, J.-P., 1982. L'évolution paléogéographique de la plate-forme Nord-aquitaine durant le Crétacé supérieur. *Cretaceous Research*, (3): 47–55.
- Pautreau, J.-P., 1976. L'habitat Peu-richardien de la Sauzaie (Commune de Soubise, Charente-Maritime). *Revue archéologique du Centre de la France*, 15, (3–4): 350.
- Platel, J.-P., 1996. Stratigraphie, sédimentologie et évolution géodynamique de la plate-forme carbonatée du Crétacé supérieur du nord du bassin d'Aquitaine. *Géologie de la France*, (4): 33–58.
- Platel, J.-P., Moreau, P., Vouvé, J., Debenath, A., Colmont, G.R., Gabet, C., 1976. *Carte géologique de la France à 1/50 000, feuille Saint-Agnant XIV-31 et Notice explicative (682)*.

Power, J.F., Sandoval, F.M., Ries, R.E., Merrill, S.D., 1981. Effects of topsoil and subsoil thickness on soil water content and crop production on a disturbed soil. *Soil Science Society of America Journal*, 45, (1): 124–129.

Robin, M., 1995. *Téledétection, des satellites aux SIG*. 2nd édition. Nathan Université, Paris.

Rudolph, S., van der Kruk, J., von Hebel, C., Ali, M., Herbst, M., Montzka, C., Pätzold, S., Robinson, D.A., Vereecken, H., Weierheller, L., 2015. Linking satellite derived LAI patterns with subsoil heterogeneity using large-scale ground-based electromagnetic induction measurements. *Geoderma*, 241–242 : 262–271.

Soler, L., 2012. Le site des 4 Chevaliers à Périgny (Charente-Maritime) - Présentation et contexte chrono-culturel d'une enceinte du Néolithique moyen du Centre-Ouest de la France. In CrabeNéo, *Enceintes néolithiques de l'Ouest de la France de la Seine à la Gironde*. Volume XLVIII. Historial de la Vendée, Les Lucs-sur-Boulogne, September, 99–115.

Soler, L., Mathé, D., Ard, V., Bedault, L., 2010. Découverte de mobilier Peu-Richardien en contexte de marais associé à une enceinte à fossé multiples en Charente-Maritime. In 9ème Rencontres Méridionales de Préhistoire Récente, *Dynamismes et rythmes évolutifs des sociétés de la Préhistoire récente*. Saint-Georges-de-Didonne, 8 October, 177–194.

Souchon, J.-P., Pappadimitis, N., Martin, O., Meynard, C., Thom, C., 2006. Is there an ideal digital aerial camera? *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, (1): 29–34.

Stanjek, H., Faßbinder, J.W.E., 1995. Soil aspects affecting archaeological details in aerial photographs. *Archaeological Prospection*, 2, (2): 91–101.

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

2.2 COMPLÉMENTS SUR L'ESTIMATION DU POTENTIEL DE CONSERVATION DU NIVEAU D'OCCUPATION NÉOLITHIQUE

Cette sous-partie s'intéresse aux sujets qui ont été partiellement abordés dans l'article. L'estimation du potentiel de conservation du niveau d'occupation néolithique est basée sur la mesure de la Rea (résistivité électrique apparente) qui est supposée non (ou peu) influencée par les variations lithologiques dans les bancs calcaires. L'hypothèse avancée dans l'article sera vérifiée à l'aide de données géophysiques complémentaires et de l'étude macroscopique d'affleurements géologiques.

Des prospections électriques non exploitées dans l'article seront ensuite présentées et discutées. Les sections de résistivité apportent des informations supplémentaires sur les fossés néolithiques. Elles permettent aussi de confronter les épaisseurs de sol avec les modèles inverses de subsurface. L'hétérogénéité apparente du milieu plus résistant (MR), correspondant au substrat calcaire sur les sections électriques, sera discutée afin de différencier la réalité géologique de l'artefact d'inversion. Les pénétrogrammes effectués sur les fossés néolithiques fournissent une information sur l'épaisseur du fossé et sur l'hétérogénéité du comblement, notamment sur la présence d'amas calcaires. Ils sont utilisés pour ajuster les modèles proposés par les sections électriques. Ensuite, des cartes de la REa avec un écartement inter-électrodes de 1 m ont été réalisées à la fois sur le plateau calcaire, la paléo-falaise et le versant de la vallée à proximité du site. La confrontation de cartes électriques à différentes profondeurs d'investigation permet d'avoir une approche qualitative de la profondeur d'apparition du substrat. La comparaison de ces deux jeux de cartes électriques avec le modèle de l'épaisseur de sol est de nouveau un moyen de vérifier sa cohérence.

Enfin, une carte de la topographie du substrat calcaire sera discutée. Elle est acquise par le retrait de l'épaisseur de sol au modèle numérique de surface (MNS) généré à partir des photographies aériennes du drone (Chapitre III, partie 5.3). L'objectif est d'alimenter le modèle du potentiel de conservation du niveau d'occupation néolithique en prenant en compte des facteurs d'ordre géomorphologique.

2.2.1 Le plateau calcaire et la paléo-falaise

Dans le cadre de l'étude paléoenvironnementale de la vallée bordant le site néolithique du Pontet, des prospections électromagnétiques à large maille ont été réalisées avec l'EM31-MK2. Elles fournissent une carte de la variation spatiale de la conductivité électrique apparente (CEa) pour une profondeur d'investigation comprise entre 1,5 et 5 m (Figure 2.3). Compte-tenu du volume d'intégration de la mesure, cette carte détaille les variations lithologiques entre la partie basse et les versants de la vallée du Grand Écours (elle sera discutée plus en détail dans le volet géomorphologique : Chapitre V).

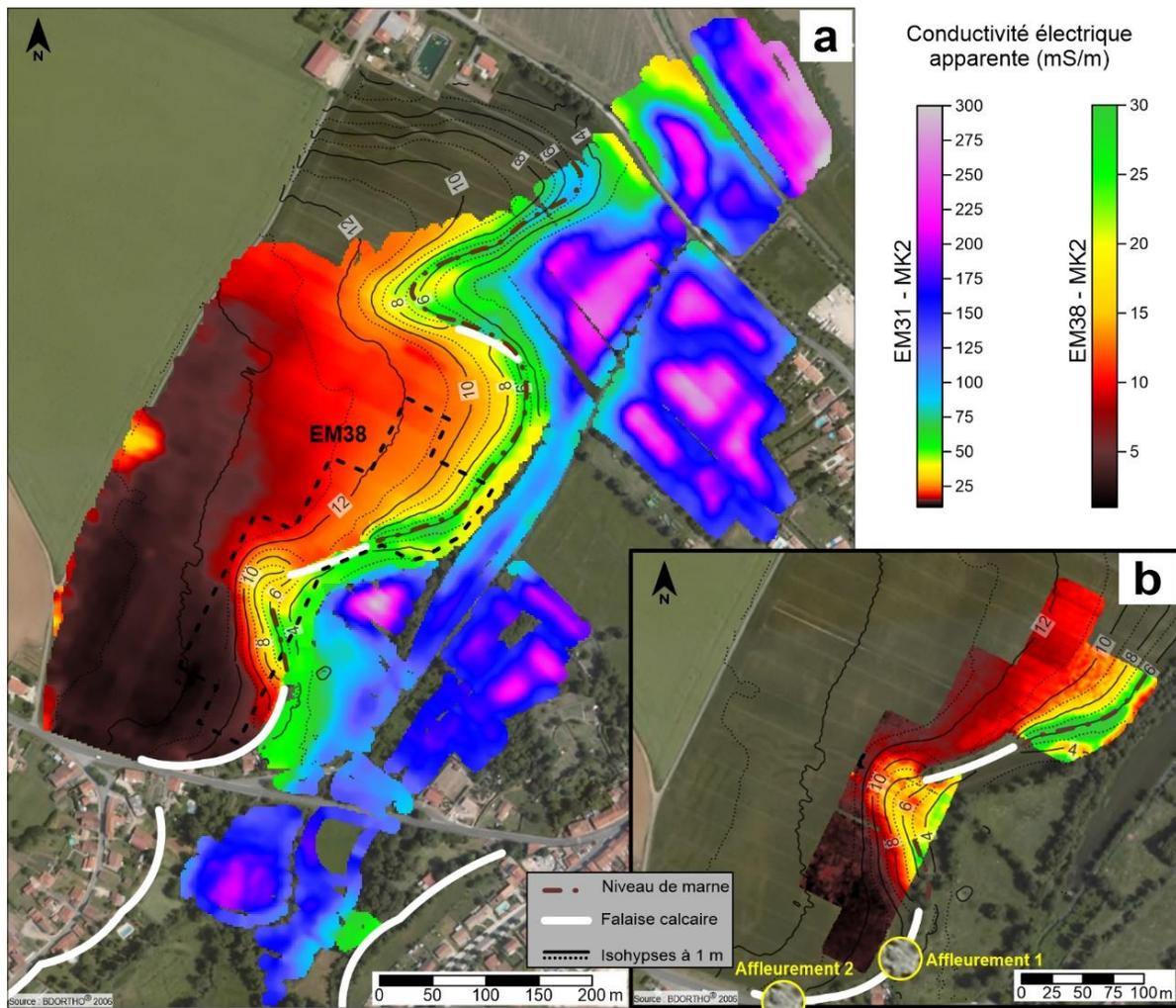


Figure 2.3 : (a) Carte de conductivité électrique apparente à large maille (2x2 m) de la vallée bordant le site néolithique du Pontet pour une profondeur d'investigation de 1,5 à 5 m (EM31-MK2). (b) Carte de conductivité apparente à maille plus fine (1x1 m) pour une profondeur d'investigation de 1,5 m (EM38-MK2).

La carte de CEA à large maille met en évidence une zone plus conductrice (> 100 mS/m) présente dans la partie basse de la vallée et une plus résistante (< 50 mS/m) localisée sur le plateau (Figure 2.3a). Le milieu plus conducteur correspond à des alluvions fines fluvio-marines comblant le fond de vallée. Le milieu plus résistant est associé aux formations calcaires du plateau. Les versants sont caractérisés par des CEA en transition avec ces deux milieux. Une couche plus conductrice (entre 50 et 75 mS/m) est présente sur les versants. Elle suit l'isohypse 6 m NGF : cette couche est tabulaire à l'échelle du site. Elle est interprétée comme le niveau de marne de la base du Turonien inférieur (*Marnes grises à Exogyra columba gigas* ; Bourgueil et al., 1972).

Sur la carte de la CEA à maille plus fine (Figure 2.3b), les mêmes milieux que précédemment sont reconnaissables. Les CEA mesurées à l'EM38-MK2 sont plus faibles car la contribution du sol sur la mesure (très sec durant la prospection) est plus importante que celle effectuée à l'EM31. Ainsi, le niveau marneux est identifié par une couche plus conductrice (> 20 mS/m) et le milieu plus résistant caractérise le plateau calcaire et le versant. Sur cette carte, la couche de marne est délimitée par les isohypses 4 et 8 m NGF. Son épaisseur estimée est de 4 m. Elle est cohérente avec la puissance de 5 m

renseignée dans la notice de la carte géologique de Rochefort. Ainsi, la base du Turonien inférieur débute au niveau de l'isohypse 4 m NGF. Cependant, la carte géologique renseigne cette limite à 2 m NGF. Cette différence est normale car une note dans la notice de la carte de Rochefort indique que la limite Cénomanién-Turonien entre Port-des-Barques et Soubise est fautive et qu'une mince bande du Cénomanién terminal affleure dans la partie aval de la vallée du Grand Écours (Bourgueil et *al.*, 1972) : la limite Cénomanién-Turonien de la carte géologique est rehaussée à des isohypses plus élevées.

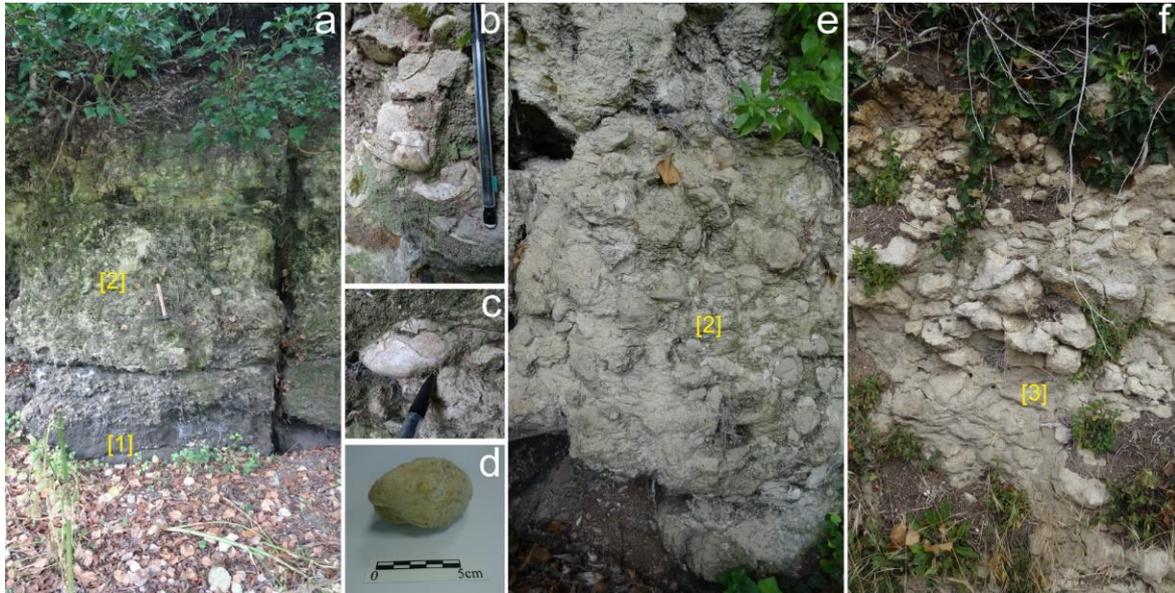


Figure 2.4 : Photographies des affleurements géologiques près du site du Pontet (localisation sur la Figure 2.3b : affleurement 1 pour « a, b, c et e » et affleurement 2 pour « f »). (a) La falaise calcaire est composée à la base par des calcaires marneux grisâtres [1] riches en fossiles d'huîtres de type *Exogyra columba gigas*. La partie supérieure correspond à des calcaires blanc-grisâtre à miches carbonatées avec des fossiles d'huîtres [2]. (b) et (c) Fossiles d'*Exogyra columba gigas* présents sur la falaise. (d) *Exogyra columba gigas* ramassée en bas du versant. (e) Agrandissement sur les calcaires grisâtres à miches carbonatées [2] reposant sur les calcaires marneux [1]. (f) Calcaires blanchâtres à miches carbonatées [3], plus blancs que les calcaires [2].

Près du site du Pontet, deux affleurements localisés en bordure de la falaise (Figure 2.3b, affleurement 1 et 2) permettent d'observer les formations calcaires composant cette dernière. La Figure 2.4 présente des photographies de ces deux affleurements. Au niveau de la falaise calcaire (Figure 2.3b, affleurement 1), le niveau des *Marnes grises à Exogyra columba gigas* n'est pas directement visible. Il est probablement présent sous les dépôts d'éboulis de la falaise. Néanmoins, la base est composée par des calcaires marneux grisâtres [1], riches en fossiles d'huître de type *Exogyra columba gigas* (Figure 2.4b-c-d). Ils correspondent à la partie supérieure des marnes décrites dans la carte géologique de Rochefort (Bourgueil et *al.*, 1972). La partie sus-jacente correspond à des calcaires blanc-grisâtre avec des faciès saccharoïdes et crayeux comprenant de nombreuses miches carbonatées (Figure 2.4a-e, [2]) et associés à des fossiles d'huître (Figure 2.4b-c-d). L'affleurement 2 (Figure 2.3b) permet de poursuivre la lecture de ce niveau [2] qui est ici caractérisé par un calcaire quasi-similaire mais légèrement plus blanchâtre (Figure 2.4f, [3]). Ces deux niveaux calcaires [2] et [3] correspondent à la même couche géologique décrite comme les *Calcaires crayeux à ammonites* (Platel, 1996 ; Kennedy et Gale, 2016), aussi appelés *Calcaires à Céphalopodes* (Bourgueil et *al.*, 1972 ; Moreau et Platel, 1982).

Ces deux affleurements de la falaise du Pontet montrent des niveaux géologiques homogènes sans grande variation lithologique et associés à la formation du Turonien inférieur. Vers la bordure NW du site, les calcaires acquièrent un faciès crayeux plus dominant lié à la proximité avec la limite entre le Turonien inférieur et moyen. Néanmoins, la distinction entre le Turonien inférieur terminal et la base du Turonien moyen est d'ordre biostratigraphique et non lithologique (Moreau et Platel, 1982 ; Kennedy et Gale, 2016).

La couche des *Marnes grises à Exogyra columba gigas* est donc un repère stratigraphique à l'échelle de la vallée du Grand Écours. En effet, elle est identifiée à la fois sur les affleurements et les cartes de la CEa (Figure 2.3). Le plateau calcaire est très homogène sur la carte de la CEa à large maille (Figure 2.3a), surtout au niveau du site et dans la partie NW, avec des CEa inférieures à 20 mS/m. Un gradient de conductivité est visible sur le versant NE et suit la topographie du versant. Dans cette partie, le versant a une pente plus faible (varie de 7 à 14 %) par rapport à la paléo-falaise près du site néolithique (pente de 17,5 %). Ce gradient de conductivité traduit soit la transition progressive entre les calcaires marneux des *Marnes à Exogyra columba gigas* et les calcaires crayeux des *Calcaires à céphalopodes*, soit la présence de colluvions (plus conducteurs que le substrat calcaire).

Les cartes de la CEa à larges et plus fines mailles ainsi que les observations des affleurements géologiques près du site montrent une homogénéité des formations calcaires situées au-dessus du niveau marneux (Figure 2.3 et 2.4). L'absence de variations lithologiques est donc validée au niveau du site néolithique. De ce fait, la mesure de la REa peut être considérée comme uniquement influencée par l'épaisseur de sol développé sur le substrat calcaire (soit la variation de la profondeur d'apparition de son toit). Sur l'orthographe du site, ce constat est aussi valable pour les anomalies phytologiques liées à la croissance du blé. Cependant, l'extension de ce protocole à l'ensemble du plateau calcaire ne peut pas être effectuée. En effet, la carte de la CEa à large maille montre des variations dans la partie NE liées à la pente plus faible du versant (Figure 2.3). Il serait alors nécessaire d'y effectuer des mesures de pénétrométrie et des prospections électriques supplémentaires pour un nouvel ajustement afin d'étendre la carte d'épaisseur de sol à l'ensemble du plateau calcaire.

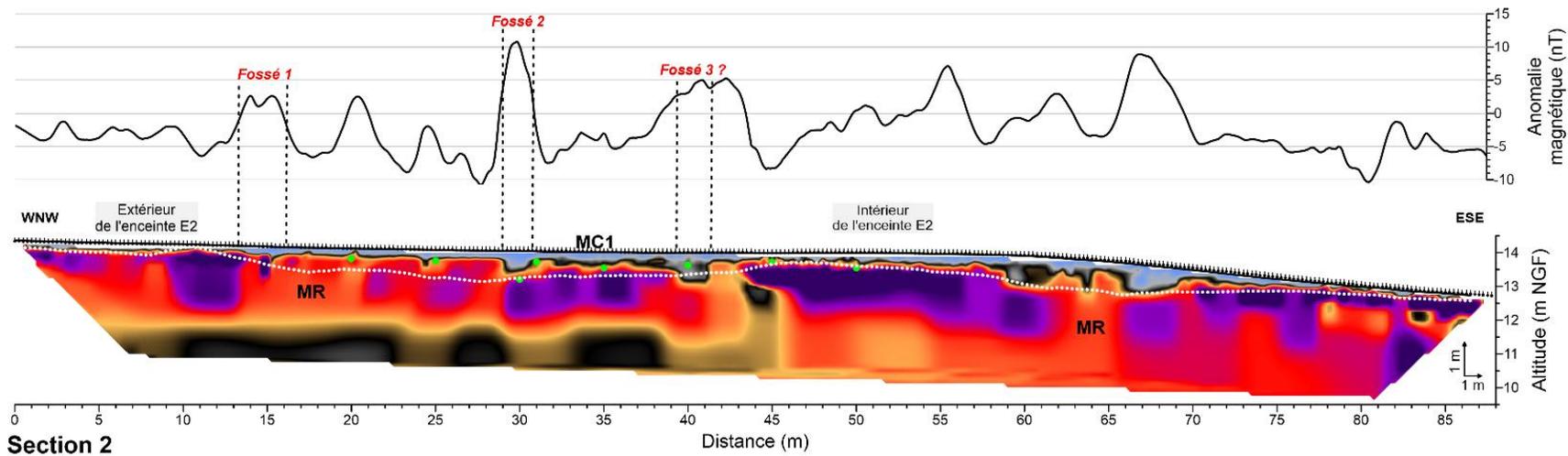
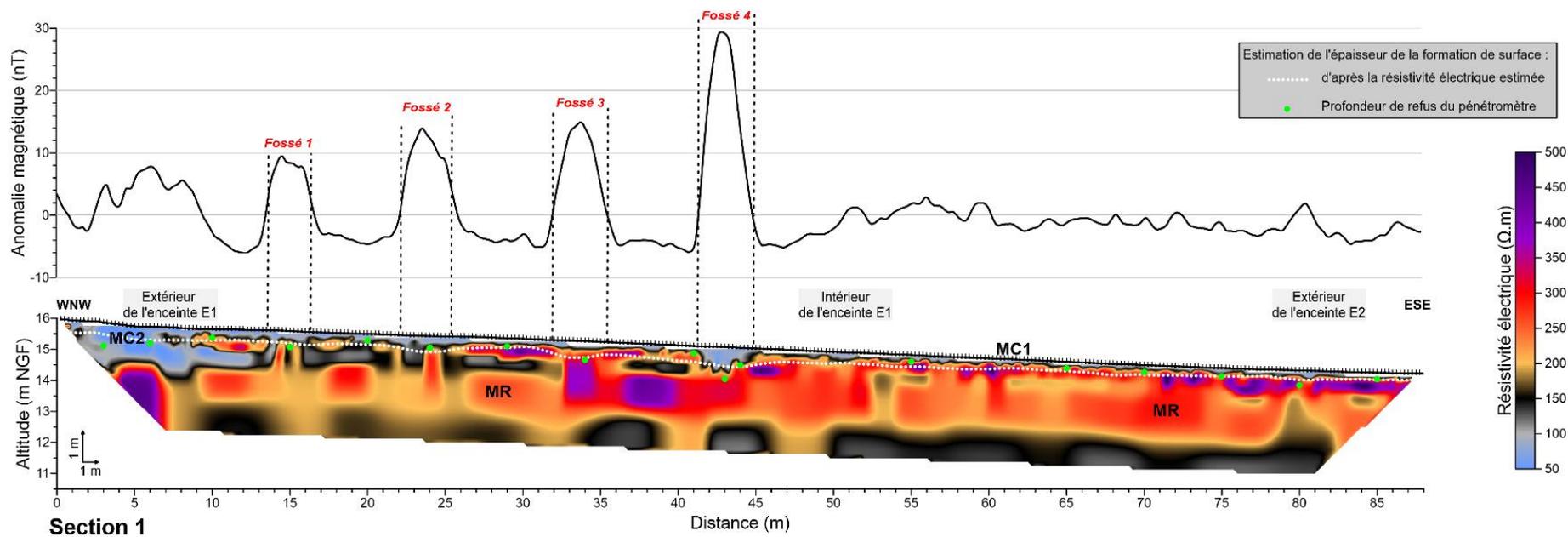


Figure 2.5 : Transect électrique recoupant les enceintes externe (E1) et médiane (E2) composé des sections de résistivité électrique 1 et 2. Elles sont représentées en parallèle d'un profil magnétique extrait de la carte du site.

2.2.2 Les sections de résistivité électrique

Les sections électriques 1, 2 et 3 ont été utilisées pour imager la géométrie des structures de la subsurface avec une bonne résolution et aussi pour estimer l'épaisseur de sol recouvrant le substrat de manière continue. Les sections 1 et 2 forment un transect recoupant les enceintes externe et médiane du site. La section 3 est positionnée en travers du sondage (Figure 2.2). Trois autres sections recoupent l'enceinte externe : sections 4, 5 et 6. La section 7 est implantée en travers de l'enceinte médiane à proximité de la paléo-falaise.

2.2.2.1 Compléments sur les sections 1, 2 et 3

Les sections électriques 1, 2 et 3 ont été présentées dans la partie précédente (Chapitre IV, partie 2.1). La géométrie du toit du substrat calcaire et les variations de l'épaisseur de sol ont également déjà été discutées, ainsi que la morphologie des fossés néolithiques. Sur la Figure 2.5, les sections 1 et 2 sont présentées en parallèle d'un profil magnétique. Ce dernier est utilisé pour identifier les fossés néolithiques sur les sections électriques. Les fossés 1, 2 et 3 de l'enceinte externe (E1) et le fossé 1 de l'enceinte médiane (E2) sont difficilement identifiables sans l'aide de ce profil magnétique. Ils présentent un faible contraste avec le substrat dont le comblement pourrait être interprété comme des cailloutis calcaires. Néanmoins, l'intensité du signal magnétique est relativement forte au niveau de ces fossés. L'hypothèse est que la source du signal pourrait être associée aux fines couches plus conductrices au-dessus de ces derniers pouvant être composés par un sédiment plus argileux et plus magnétique (présence de tessons, de matières organiques ou de cendres). À l'inverse, les fossés 4 et 2 de l'enceinte externe et médiane sont clairement reconnaissables à la fois sur les sections électriques et sur les profils magnétiques.

Les variations de résistivité électrique au sein du substrat calcaire n'ont pas été discutées. En effet, les sections 1 et 2 montrent des anomalies locales de forte résistivité au sein du calcaire (MR). Les valeurs les plus extrêmes sont aux alentours de $500 \Omega.m$. Elles ont des formes globalement rectangulaires (Figure 2.5). Ces anomalies pourraient être d'origine naturelle : elles correspondraient alors à des hétérogénéités dans le calcaire (faciès plus saccharoïdes et d'autres plus crayeux par exemple). Toutefois, ces anomalies locales peuvent aussi trouver leurs origines dans la mesure de la résistivité apparente. En effet, les sections électriques ont été acquises selon un écartement inter-électrodes réduit (0,2 et 0,25 m) et en période sèche, ce qui implique une forte résistance de contact. De plus, les électrodes sont plantées dans un sol comportant de nombreux cailloux calcaires très résistants. Ces trois facteurs favorisent le bruit dans les mesures de potentiel électrique. Par ailleurs, la configuration dipôle-dipôle possède un niveau de bruit plus important que d'autres configurations telles que le Wenner ou le Wenner-Schlumberger (Dahlin et Zhou, 2004). La combinaison d'une forte résistance de contact, de cailloutis très résistants proches des électrodes et d'un petit écartement introduit dans la pseudosection

un bruit relativement élevé. Même si les algorithmes d'inversion limitent l'influence du bruit (Loke, 2013), le modèle de résistivité résultant peut présenter des artefacts. Ils correspondraient alors à anomalies locales de forte résistivité.

La simulation d'une pseudosection sur un modèle à deux couches caractérisant le sol et son substrat calcaire (avec l'introduction d'un bruit sur les mesures et de micro-variations simulant les petits blocs en surface) génère un modèle de résistivité présentant des variations locales assez similaires à celles observées sur les sections électriques. De plus, la modification des paramètres d'inversion (notamment la taille des blocs et les paramètres de lissage) a tendance à atténuer ce phénomène. De ce fait, sur les sections électriques 1 et 2, les fortes variations locales sont probablement des artefacts d'inversion plus qu'une réalité géologique.

De l'extérieur de l'enceinte externe jusqu'aux fossés 1 et 2 (Figure 2.5), la section 1 montre un substrat hétérogène composé de structures de résistivité variée dont la partie la plus conductrice (MC2) correspond au calcaire avec un horizon de décarbonatation. Dans cette zone, l'identification des fossés est difficile. Ceux-ci semblent bordés par de fines couches très résistantes présentes en surface. Ces structures résistantes ne sont pas visibles sur la section 5 (Figure 2.6). Une explication serait que la résolution verticale avec un écartement de 0,5 m est insuffisante pour les détecter. Néanmoins, la section 5 présente un substrat homogène contrairement à la section 1 (Figure 2.5). De ce fait, ces petites couches très résistantes sont sûrement des artefacts d'inversion. Compte-tenu des diverses informations, il semble que l'écartement inter-électrodes à 0,2 et 0,25 m soit une limite instrumentale pour correctement détecter des fossés néolithiques sur des sols calcaires « accidentés » (influence du labour, de la microtopographie, sol sec...) avec une bonne résolution verticale et un ratio signal/bruit correct. La diminution de l'écartement sur ce type terrain entraînerait une pseudosection très bruitée et un modèle de mauvaise qualité. Dans l'optique d'acquérir une information à plus haute résolution que la section électrique à 0,2 m, il serait plus judicieux d'utiliser des méthodes telles que le géoradar. Il serait bien adapté (à condition que la microtopographie soit la plus plane possible, comme après la récolte du blé) car le contraste électrique est important entre le sol et le substrat et l'environnement est résistant.

2.2.2.2 Les sections électriques 4, 5 et 6 : fossés de l'enceinte externe

Les sections électriques 4, 5 et 6 sont implantées en travers de l'enceinte externe (Figure 2.2) et sont illustrées sur la (Figure 2.6). La première est localisée à proximité de l'entrée principale I4 avec un écartement inter-électrodes de 0,2 m, la seconde, au milieu de l'enceinte avec un écartement de 0,5 m et la dernière, au sud de l'enceinte avec un écartement de 0,25 m. Les deux premières ont été effectuées en janvier 2015 et la dernière en octobre 2016. Les conditions climatiques lors de la prospection de janvier 2015 étaient différentes de celle d'octobre 2016 impliquant une gamme de résistivité électrique plus faible pour les sections 4 et 5 (sol plus humide) que pour la section 6. Néanmoins, les anomalies électriques identifiées sont les mêmes.

Ces trois sections électriques présentent un milieu plus résistant (MR) correspondant au substrat calcaire. Sur les sections 4 et 5, il est caractérisé par des résistivités supérieures à 140 Ω .m et supérieures à 200 Ω .m sur la section 6. Le milieu plus conducteur en surface est identifié comme la formation de surface (FS : partie supérieure du sol sans le faciès d'altération du calcaire) développée sur le substrat. Il possède des résistivités inférieures à 100 Ω .m sur les sections 4 et 5 et inférieures à 150 Ω .m sur la section 6. Sur la section 5 (Figure 2.6), le milieu résistant est beaucoup plus homogène que sur les sections 1 et 2 (Figure 2.5). Comme la section 5 a été réalisée avec un écartement plus grand et des électrodes implantées dans un sol plus humide (plus faible résistance de contact), le bruit sur les mesures de potentiel est réduit d'où une section électrique peu affectée par des artefacts d'inversion. Ainsi, le substrat calcaire semble être électriquement homogène et, par extension, géologiquement homogène.

Sur la section 5, un troisième milieu plus conducteur (MC3) est présent à sa base (altitude d'environ 10 m NGF). Il est caractérisé par des résistivités inférieures à 75 Ω .m et pourrait être assimilé au niveau marneux des *Marnes grises à Exogyra columba gigas* (Bourgueil et al., 1972). En effet, la CEa du niveau de marnes est d'environ 50 mS/m (soit 20 Ω .m) sur la carte à large maille (Figure 2.3a) et de l'ordre de 25 mS/m (soit 40 Ω .m) sur la carte à plus fine maille (Figure 2.3b). Les gammes de la CEa du niveau marneux sont cohérentes avec la résistivité du milieu plus conducteur sur la section. Néanmoins, la profondeur d'apparition du toit de cette couche est d'environ 10 m NGF sur la section électrique et de 8 m NGF sur la carte à plus fine maille (Figure 2.3 et 2.6). Il est préférable de se fier à la carte de conductivité car le niveau marneux est situé à la base de la section soit dans la partie avec une résolution verticale plus faible qu'à la surface. De plus, les blocs du modèle inverse ont un poids plus élevé lors de l'inversion que ceux au centre et ceci peut engendrer des distorsions (Loke, 2014). Néanmoins, cette couche stratigraphique repère est clairement identifiée au niveau du site néolithique, attestant que le niveau supérieur correspond au calcaire du Turonien inférieur (Figure 2.6).

L'ensemble des fossés néolithiques de l'enceinte externe sur les sections 1, 4, 5 et 6 (Figure 2.5 et 2.6) correspond à des creusements plus ou moins importants dans le substrat calcaire. Ils sont bien corrélés avec les anomalies magnétiques. Leurs largeurs sont de 2 à 4 m maximum et leurs profondeurs ne dépassent pas 1 m. L'estimation de la profondeur n'est pas aisée car elle dépend de l'interprétation du comblement. Notamment quand ce dernier est résistant car il peut correspondre à des cailloutis calcaires (partie intégrante du fossé) ou au substrat calcaire (fin du fossé). La profondeur de refus des essais pénétrométriques effectués sur les fossés en parallèle des sections 1 et 4 permettent d'avoir une autre estimation (Figure 2.7). Le fossé 4 (section 1) est le plus profond avec un refus à 1 m. Les fossés 1 et 2 (section 4) et les fossés 1 et 3 (section 1) ont une profondeur comprise entre 0,5 et 0,75 m. C'est le fossé 2 (section 1) qui apparaît le moins épais avec un refus à 0,3 m. Néanmoins, ce sont des estimations car la forte variabilité des pénétrogrammes traduit la présence de cailloutis calcaires (ou des tessons) dans les fossés : la profondeur de refus n'est qu'une valeur minimale de la profondeur des fossés car la pointe peut s'être arrêtée sur un bloc. Les pénétrogrammes fournissent ainsi une seconde estimation de

l'épaisseur de comblement des fossés. D'ailleurs, les profondeurs de refus sur le fossé 2 (section 4) et sur les fossés 1, 2 et 4 (section 1) sont cohérentes avec les épaisseurs de ces derniers sur ces sections électriques. En revanche, la profondeur du fossé 3 est sous-estimée par le pénétrogramme par rapport à la section 4 (présence d'un bloc calcaire ?). À l'opposé, la section 1 sous-estime l'épaisseur du fossé 3 par rapport au pénétrogramme.

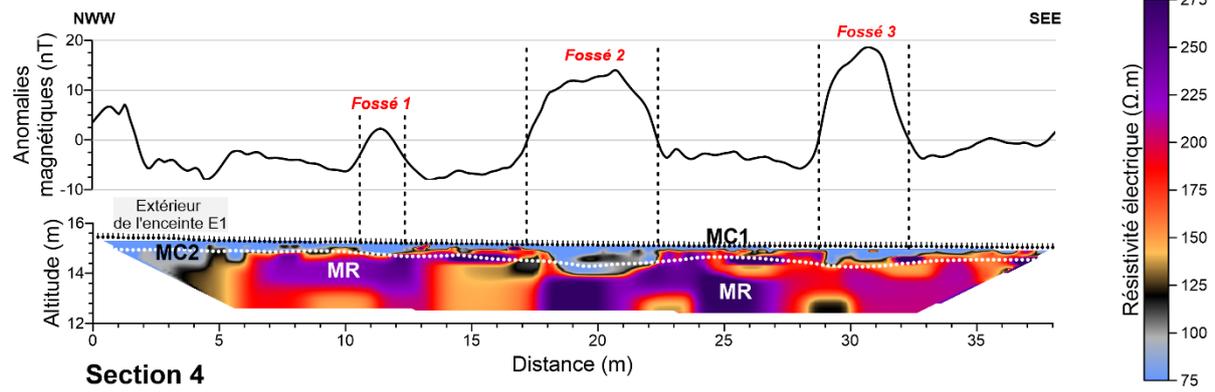
Les fossés 1 et 3 (les moins épais) présentent un comblement latéralement homogène. En revanche, la morphologie et le comblement des fossés 2, 3 et 4 varient latéralement suivant la position des sections électriques par rapport à l'enceinte (Figure 2.6). Le fossé 2 sur les sections 4 et 5 est clairement identifiable et possède un comblement caractérisé par des matériaux de même signature électrique que la formation de surface (FS : épaisseur de sol sans le niveau d'occupation) pour une profondeur d'environ 1 m (section 4, MC1). La partie plus résistante au centre de ce fossé 2 (section 4) semble être une réalité car elle se corrèle aux fortes résistances de pointe et à la profondeur de refus sur le pénétrogramme (Figure 2.7). Cette zone plus résistante semble être un amas calcaire. À l'inverse, sur la section 1 pourtant proche de la section 5 (Figure 2.2 et 2.5), le fossé 2 présente un comblement majoritairement plus résistant (mais associé à une anomalie magnétique de même intensité). Sur la section 6, le fossé 2 est difficilement identifiable sans le profil magnétique car sa signature électrique est proche du substrat (calcaires avec un horizon de décarbonatation, MC2).

Sur les sections 1 et 5 (Figure 2.5 et 2.6), le fossé intérieur (fossé 4) possède un signal magnétique de forte intensité (entre 20 et 30 nT) et un comblement homogène composé de matériaux aussi conducteurs que la formation de surface FS (MC1). Le pénétrogramme présente de fortes variations locales de la résistance de pointe (augmentation de 150 %) traduisant la présence de blocs calcaires (Figure 2.7). Sur le site de Chenommet, le fossé interne était aussi le plus magnétique avec un comblement composé par un horizon organique noir possédant une susceptibilité magnétique élevée ($3-4 \cdot 10^{-3}$ SI) associée à des matériaux ayant chauffé et des cailloutis calcaires dans la partie inférieure (Ard *et al.*, 2015a). Avec des anomalies magnétiques aussi élevées et comblé par un milieu plus conducteur (Figure 2.5), il est probable que le remplissage du fossé 4 soit de même nature que celui du fossé interne de l'enceinte de Chenommet.

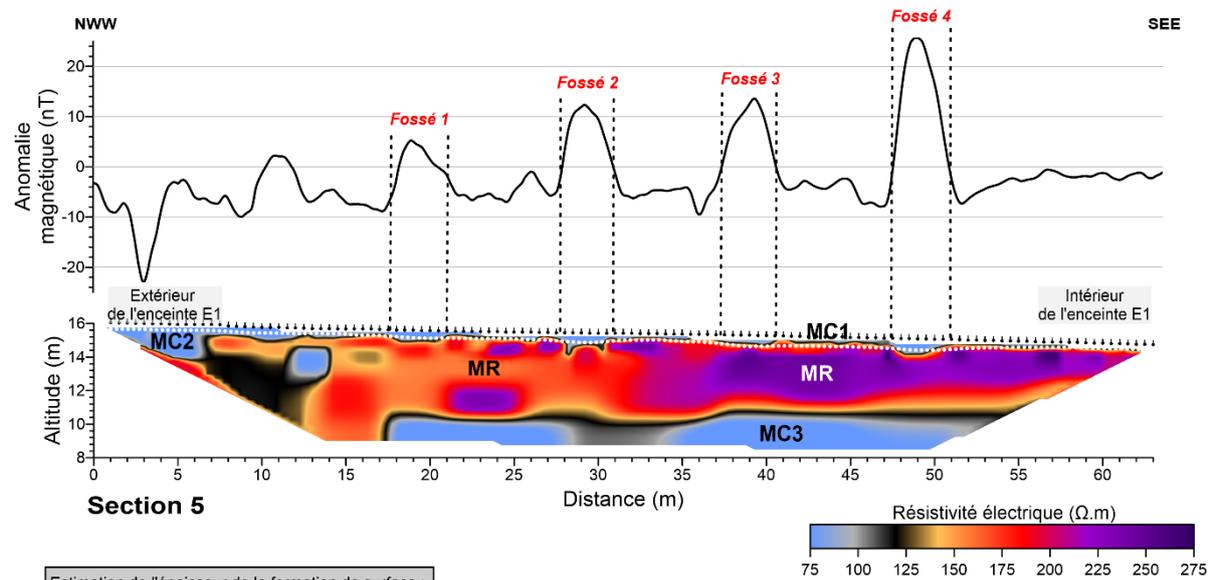
2.2.2.3 Sections électriques 4, 5, 6 et 7 : contrôle de l'épaisseur de sol

Le potentiel de conservation du niveau d'occupation néolithique est déterminé à partir de l'estimation de l'épaisseur de sol recouvrant le substrat calcaire. Cette épaisseur est calculée à partir de la conversion des pixels de l'orthophotographie du site en résistivité électrique estimée. Le contrôle du modèle d'épaisseur de sol a été effectué à partir d'essais pénétrométriques et des sections de résistivité électriques (Figure 2.5 ; sections 1, 2 et 3). Les épaisseurs de sol estimées sont aussi indiquées sur les sections électriques 4, 5, 6 et 7 (Figure 2.6 et 2.8).

Écartement inter-électrodes : 0,2 m



Écartement inter-électrodes : 0,5 m



Estimation de l'épaisseur de la formation de surface :
 d'après la résistivité électrique estimée

Écartement inter-électrodes : 0,25 m

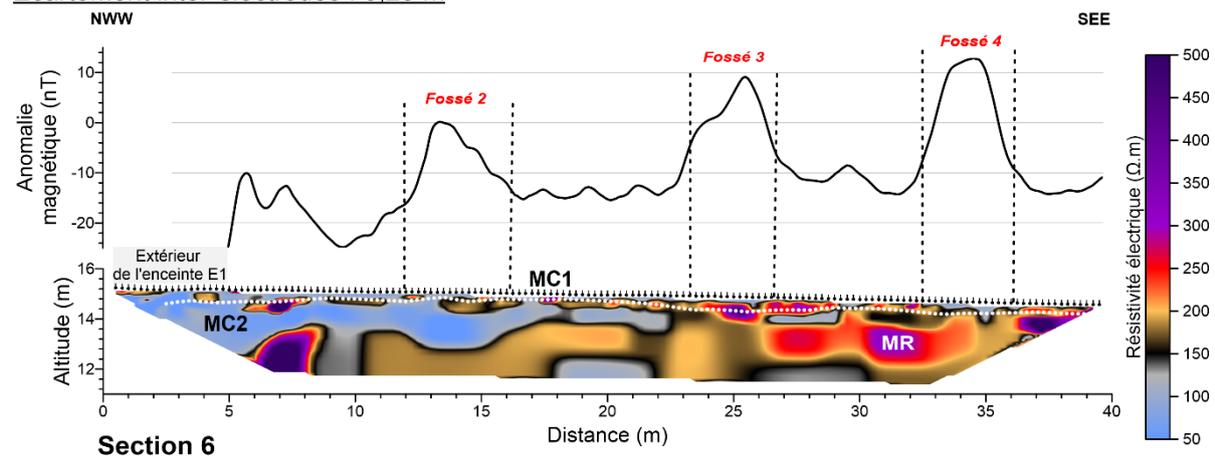


Figure 2.6 : Sections de résistivité électrique 4, 5 et 6 représentées en parallèle de profils magnétiques.

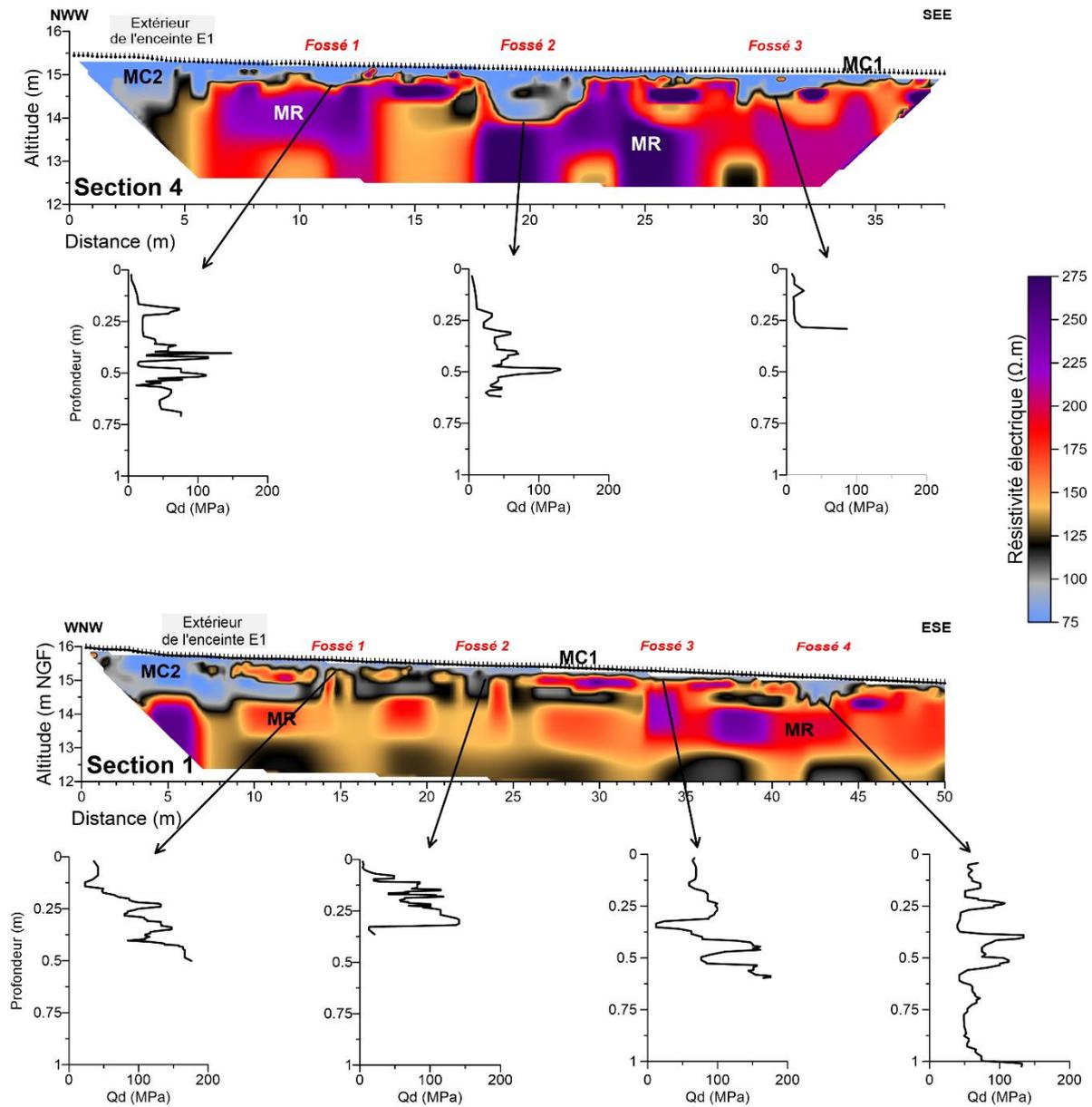


Figure 2.7 : Pénétragrammes des fossés 1 à 3 de la section 4 (essais pénétrométriques effectués à 10 m plus au sud de la section) et des fossés 1 à 4 de la section 1. Qd : résistance de pointe.

Sur la section 4 (Figure 2.6), l'épaisseur de sol suit correctement la base du milieu plus conducteur (MC1) interprété comme la formation de surface FS développée sur le substrat (MR), notamment dans la partie ouest jusqu'au fossé 2. Sur ce dernier, l'épaisseur de sol ne suit pas la forme du fossé 2. Ceci est liée à la saturation du canal rouge au niveau des fossés. De ce fait, la résistivité estimée par le canal rouge présente peu de variation par rapport à la résistivité apparente. Dans la partie est, l'épaisseur de sol est surestimée d'environ 0,25 m. Cette partie de la section correspond à la zone plus conductrice C2 qui est localisée au niveau d'une ancienne limite de parcelle (AS-Figure 7). La section 4 montre ainsi que cette zone présente des erreurs pour l'évaluation de l'épaisseur de sol et du potentiel de conservation du niveau d'occupation.

Sur la section 6, l'épaisseur de sol suit assez bien la base du milieu plus conducteur (MC1) dans sa partie est. En revanche, dans sa partie ouest, sol et substrat possèdent la même signature électrique (MC2) correspondant au calcaire avec un horizon de décarbonatation. Il n'est donc pas possible d'évaluer l'épaisseur de sol dans cette partie.

Sur la section 7 (Figure 2.8), l'épaisseur de sol déterminée à partir de la résistivité estimée est mauvaise avec une surestimation de l'ordre de 0,5 m. Cette erreur a été discutée dans l'article car elle correspond à la zone résistante R2 sur la carte de résistivité électrique apparente. Cette zone R2 est associée à une zone conductrice sur la carte de résistivité estimée (AS-Figure 9 ; hachure blanche). Le profil de sol calculé à partir de la résistivité apparente est aussi présenté. Ce dernier est très fiable et il est en accord avec la section électrique 7 (Figure 2.8).

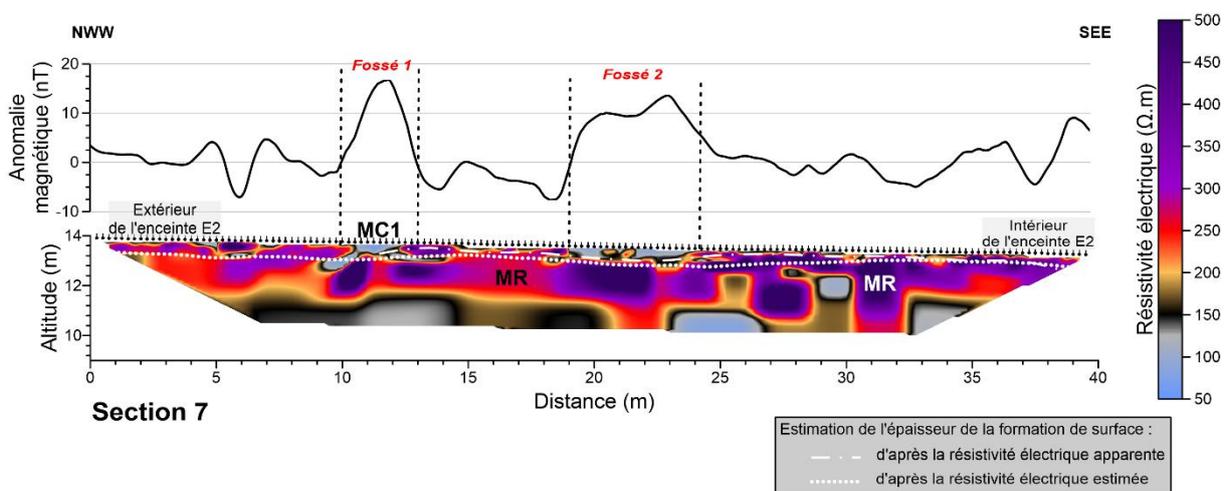


Figure 2.8 : Section de résistivité électrique 7 représentée en parallèle d'un profil magnétique extrait de la carte du site.

2.2.3 Apports des cartes de résistivité électrique apparente à 1 m

Les cartes de la REa réalisées avec un écartement inter-électrodes de 1 m ont été positionnées à partir de la carte magnétique du site (Figure 2.2). Elles sont localisées sur la paléo-falaise et le versant, là où convergent les enceintes externe et médiane, ainsi que sur la structure G et dans la partie sud de l'enceinte médiane. La prospection électrique à 1 m possède une profondeur d'investigation plus importante (environ 1 m) que celle effectuée à 0,5 m (environ 0,5 m) au détriment d'une résolution spatiale plus faible. L'écartement à 1 m est complémentaire du 0,5 m car il permet de mieux détecter la géométrie du toit du substrat dans les zones où l'épaisseur de sol est plus importante, notamment supérieure à 0,5 m.

Les cartes à 1 m sont représentées sur la Figure 2.9a et couplées à celles à 0,5 m sur la Figure 2.9b. Les échelles de couleur pour les deux cartes électriques sont similaires afin d'en faciliter la comparaison et l'interprétation. Sur le plateau calcaire (Figure 2.9a), les trois milieux plus résistants, R1 et R2 au nord (près de la paléo-falaise) et R3, se retrouvent sur les cartes électriques à 1 m avec des REa supérieures à 150 Ω .m. La répartition et les gammes de la REa pour ces trois zones sur les deux

cartes électriques sont similaires entre elles (Figure 2.9b). La combinaison des deux écartements apporte une information qualitative sur la profondeur d'apparition du toit du substrat calcaire : le substrat au niveau de R1, R2 et R3 est à une profondeur inférieure à la profondeur d'investigation de l'écartement à 0,5 m. En effet, ces trois milieux plus résistants correspondent aux zones où le substrat calcaire était quasi-affleurant, avec notamment une épaisseur de sol inférieure à 0,3 m (AS-Figure 8 et 2.9).

A l'inverse, le milieu plus résistant R2 dans la partie sud du site (près de l'enceinte interne) est plus étalé sur les cartes électriques à 1 m (Figure 2.9a). Dans cette partie, le milieu plus conducteur C1 ($< 150 \Omega.m$) sur les cartes à 0,5 m correspond à un milieu plus résistant R2 ($> 150 \Omega.m$) sur les cartes à 1 m (Figure 2.9b). En conséquence, le toit du substrat calcaire possède une profondeur d'apparition comprise en 0,5 et 1 m. Ceci est cohérent avec les valeurs comprises entre 0,6 et 0,9 m de l'épaisseur de sol dans cette zone. Ainsi, l'approche qualitative par des cartes électriques à différents écartements est efficace pour fournir un intervalle de valeurs de l'épaisseur de sol recouvrant le substrat.

La carte électrique à 1 m effectuée sur la paléo-falaise et son versant ainsi que sur l'amorce du fond de vallée (isohypse 4 m NGF) est caractérisée par deux milieux plus conducteurs notée C3 et C4. Le milieu C3 correspond à des REa comprises entre 75 et 125 $\Omega.m$, et le milieu C4 à des REa inférieures à 75 $\Omega.m$. La transition entre ces deux milieux est franche et par comparaison avec la carte magnétique (Figure 2.2 et 2.9a), le milieu C4 correspond à une zone plus magnétique que le milieu C3. Comme ils sont sur le versant, ces deux milieux semblent être associés à des formations de colluvionnement. Le gradient de la REa décroissant vers le fond de vallée pourrait traduire une augmentation de l'épaisseur de colluvions depuis le haut vers le bas du versant. Les faibles valeurs de la REa dans la partie basse (isohypse 4 m NGF) du milieu C4 traduisent sûrement la présence d'alluvions récentes.

Contrairement à la carte magnétique qui présente une anomalie locale de grande taille et de très forte intensité (Figure 2.2), le milieu plus conducteur C4 apparaît plutôt homogène sur la carte électrique à 1 m (Figure 2.9a). Sur la carte à 1 m, l'absence d'anomalie de résistivité correspondant à cette anomalie magnétique pourrait indiquer qu'elle se situe sous une épaisseur de colluvions ou d'alluvions supérieure à la profondeur d'investigation. Il n'y a pas non plus d'anomalie sur la carte de conductivité réalisée à l'EM38-MK2 pour une profondeur d'investigation effective de l'ordre de 1,5 m (Figure 2.3b). De ce fait, la source de cette anomalie magnétique est soit enfouie sous une épaisseur de colluvions ou d'alluvions supérieure aux profondeurs d'investigation des deux instruments (RM15 et EM38-MK2), soit il n'y a pas de contraste de résistivité entre la source de ces anomalies et leur encaissant. Dans le cas de la première hypothèse, comme le signal magnétique décroît selon l'inverse du carré de la distance (Aspinall et *al.*, 2008), les matériaux à l'origine de cette anomalie sont très magnétiques et probablement en grande quantité (amas de céramique ou matériaux brûlés...).

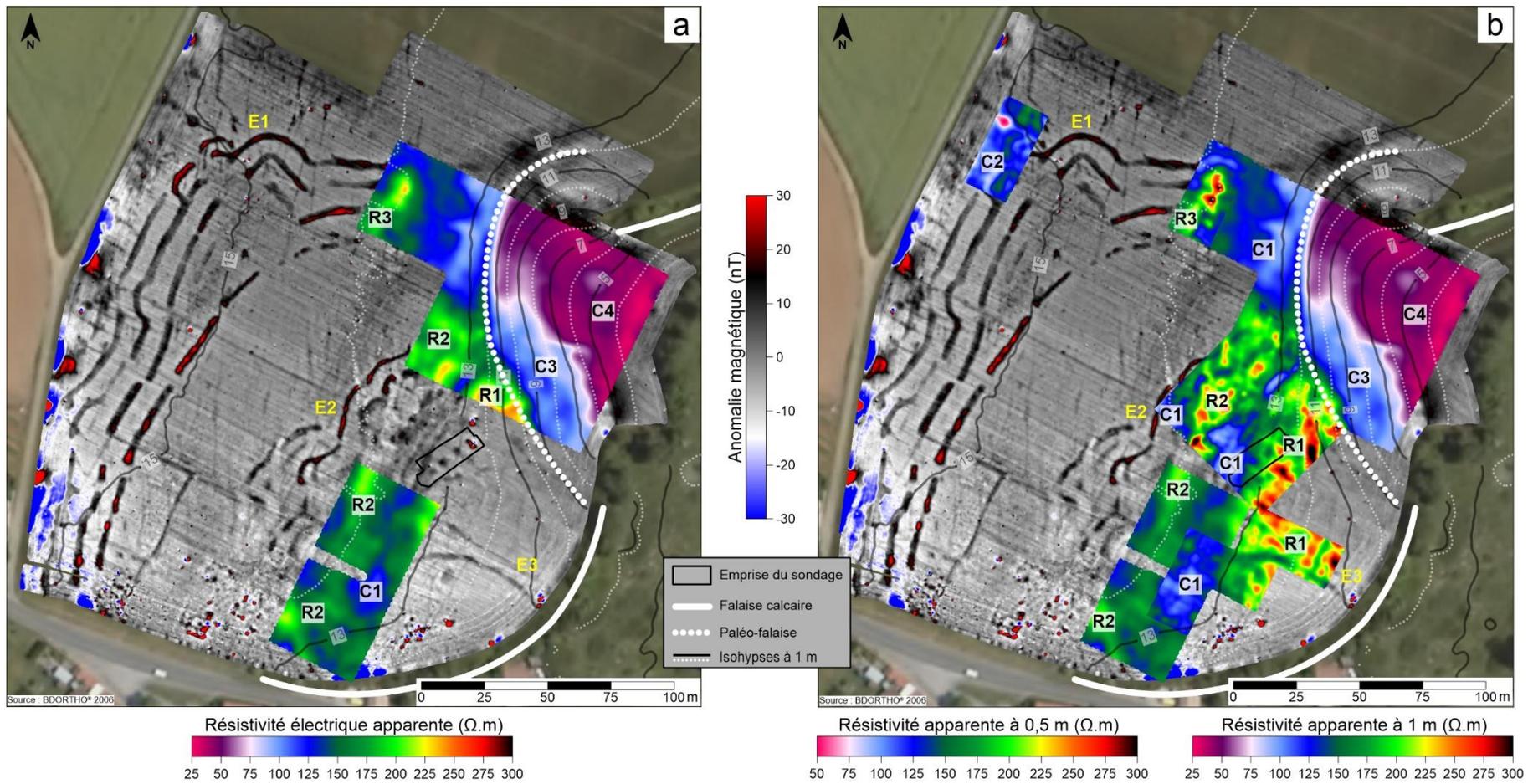


Figure 2.9 : (a) Cartes de résistivité électrique apparente à 1 m d'écartement inter-électrodes (maille 1x1 m) superposées à la carte magnétique. (b) Cartes de résistivité apparente à 0,5 et 1 m d'écartement inter-électrodes superposées à la carte magnétique.

2.2.4 Informations complémentaires sur la structure G

La structure G est composée d'un ensemble d'anomalies magnétiques formant une structure orientée N-S au niveau de l'enceinte externe. Elle est interprétée comme vraisemblablement contemporaine du site néolithique. La synthèse des différentes cartes (magnétique, électrique et topographique) est présentée sur la Figure 2.10. Cette structure G pourrait correspondre à un bâtiment sur poteaux. La partie nord de cette structure est associée, d'est en ouest, à l'anomalie magnétique linéaire G₂ et à une petite rupture de pente, suivie d'un replat large de 15 m correspondant à une anomalie magnétique de très faible intensité (Figure 2.10b). Les anomalies G₁ et G₄ ainsi que les deux fossés sont localisés sur ce replat. Sur la carte électrique (Figure 2.10c), cette rupture de pente correspond à un fort gradient de la résistivité électrique. La relation décrite ci-dessus est mieux illustrée en examinant les profils topographiques, magnétiques et électriques de cette structure (Figure 2.10d). Ce replat est associé à une anomalie magnétique de faible intensité et à une anomalie électrique très résistante. Il est fort probable que cette structure correspond à un amas calcaire. Si celui-ci est bien anthropique, il pourrait résulter d'un terrassement pour niveler le terrain. La compilation des différentes informations tend à approuver l'hypothèse d'une structure bâtie.

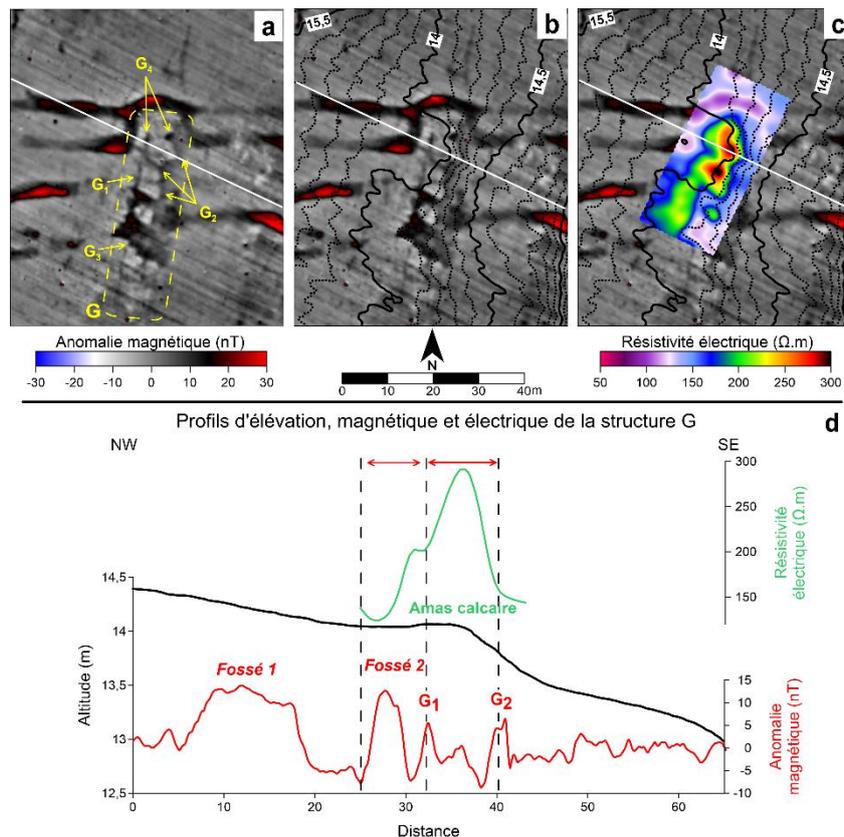


Figure 2.10 : La structure G de l'enceinte externe. (a) Carte annotée des anomalies magnétiques. (b) Carte magnétique superposée aux isohypses d'altitude (0,1 m NGF). (c) Carte de la résistivité électrique apparente à 0,5 m superposée à la carte magnétique et aux isohypses. (d) Profils topographique, magnétique et électrique de la structure G correspondant aux lignes blanches sur les cartes.

2.2.5 Carte de la topographie du substrat

La carte de la topographie du toit du substrat calcaire (Figure 2.11a) est la réciproque de la carte de l'épaisseur de sol. La topographie du substrat est obtenue par le retrait de l'épaisseur de sol au modèle numérique de surface (MNS) du site (Figure 2.11b). Par conséquent, elle possède les mêmes erreurs que sa réciproque qui ont été détaillées antérieurement. Cette carte de la topographie du substrat permet de différencier les épaisseurs de sol associées à une anomalie topographique de surface de celles liées à une dépression du substrat (Figure 2.11a).

Pour mieux imaginer la géométrie du substrat, trois profils parallèles orientés ESE-WNW sont tracés dont un au niveau du sondage (profil 1) et deux autres plus au sud de ce dernier (Figure 2.11 ; profil 2 et 3). Ils recoupent l'enceinte externe et médiane ainsi que les trois zones ayant une épaisseur de sol importante (C1a-b et C1). Ces trois profils sont illustrés sur le Figure 2.12.

Les profils 1 et 2 mettent en avant une géométrie similaire. La partie ouest, de la position 100 m jusqu'à l'enceinte externe, est caractérisée par une épaisseur de sol de l'ordre de 0,3 m avec une géométrie relativement plane du substrat et de la surface. Le profil 2 fait exception : sur l'enceinte externe, une légère dépression du substrat est identifiée. Néanmoins, c'est dans cette zone où l'horizon de décarbonatation peut induire une surestimation de la puissance du sol. Cette partie du profil a été qualifiée de « faible » sur la carte du potentiel de conservation du niveau d'occupation néolithique.

En revanche, la partie est des profils 1 et 2 recoupe la zone C1 avec une épaisseur de sol plus importante (Figure 2.12) qui a été associée à un potentiel de conservation « élevé » du niveau archéologique. Ces profils montrent que cette zone correspond à deux dépressions C1a et C1b séparées par une surélévation (R2) du substrat assimilable à une « micro-butte témoin » de forme allongée selon la direction NEE-SWW (comme la paléo-falaise et les diaclases ; Figure 2.11a-c). Même si sur la section électrique 2 l'épaisseur de sol semble être surestimée dans la dépression C1a (Figure 2.5), cette section met tout de même en évidence un creusement dans le substrat mais de moins grande ampleur que sur les profils (Figure 2.12). Sur le MNS (Figure 2.11b), la dépression C1a et cette « micro-butte témoin » sont associées à un replat. En revanche, la dépression C1b est liée à une rupture de pente (Figure 2.12 ; passage du replat à une pente de 5 %). La localisation de cette dépression (C1b) en arrière de la « micro-butte témoin (R2) » aurait pu favoriser le piégeage de colluvions, préservant ainsi le niveau d'occupation. En effet, la partie du sondage associée au niveau d'occupation néolithique est localisée dans cette dépression (profil 1 : C1b). L'enceinte médiane semble être cloisonnée dans l'autre dépression (profil 1 et 2 : C1a) et présente ainsi des conditions de préservation du niveau d'occupation très favorables (similaires à celles du sondage). Actuellement, il n'y a pas de structures néolithiques identifiées sur la carte magnétique au niveau de cette « micro-butte témoin (R2) » (Figure 2.11d).

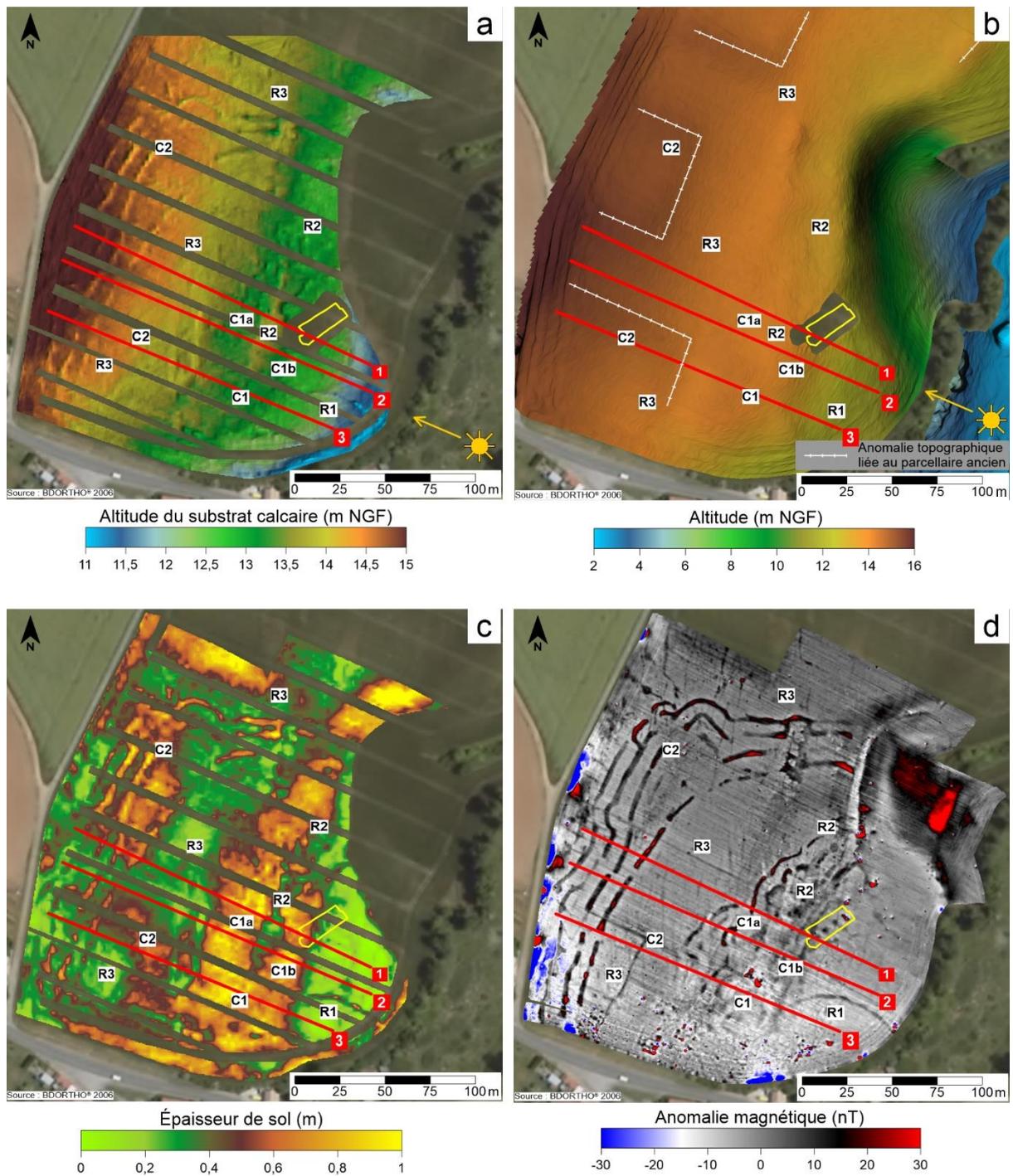


Figure 2.11 : (a) Carte de la topographie du toit du substrat calcaire avec ombrage (retrait de l'épaisseur de sol au MNS). (b) Modèle numérique de surface (MNS) avec ombrage. (c) Carte de l'épaisseur de sol estimée. (d) Carte des anomalies magnétiques réduites au pôle.

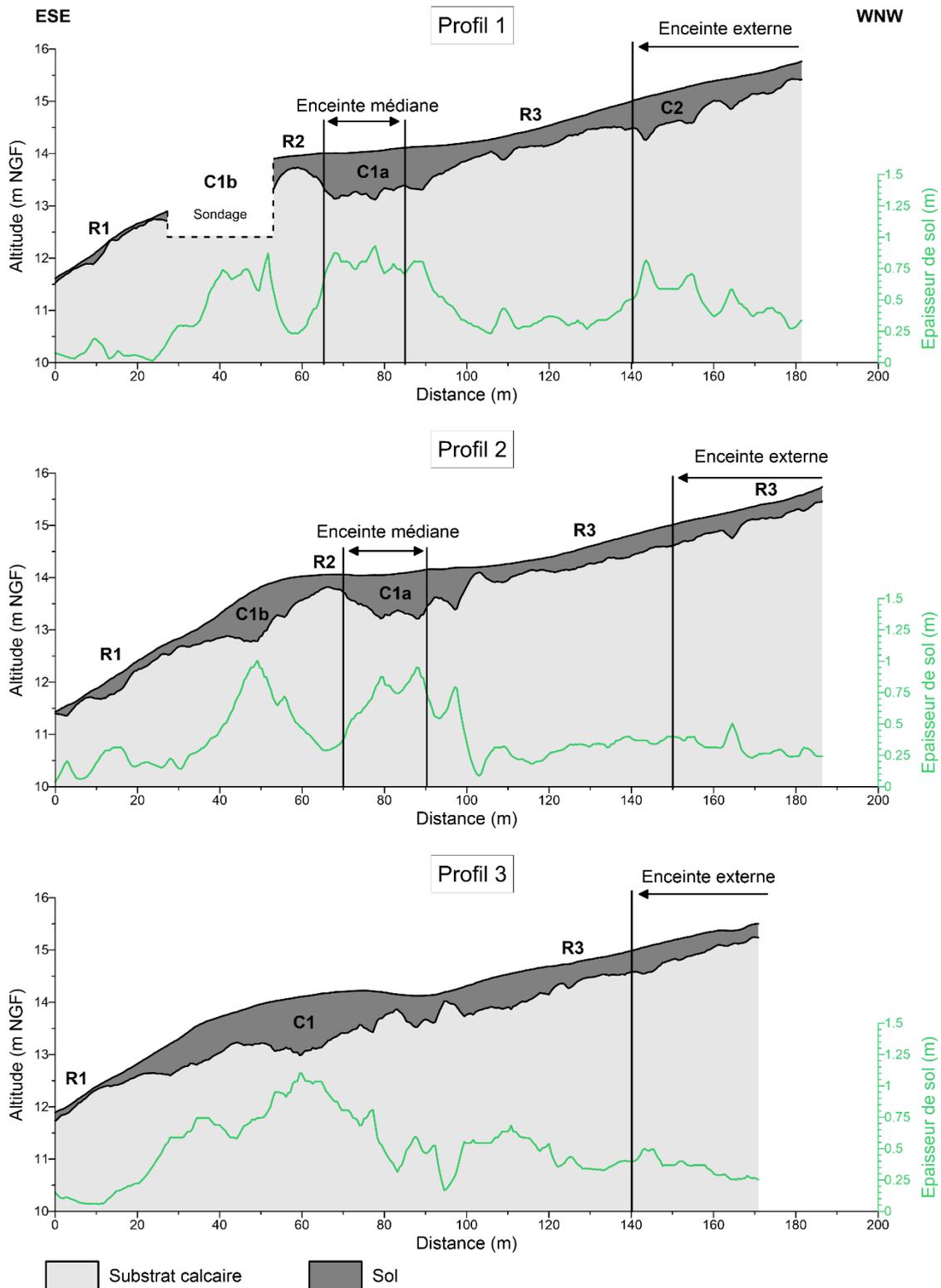


Figure 2.12 : Profils 1, 2 et 3 localisés par des tracés rouges sur la Figure 2.11. Représentation en coupe de la variation de l'épaisseur de sol et de la topographie du toit du substrat calcaire au travers de l'enceinte externe et médiane.

Les cartes de l'épaisseur de sol et de la topographie du substrat montrent que les deux dépressions C1a-b ne forment plus qu'un seul grand creusement dans le substrat sur le profil 3 (Figure 2.12). Au niveau de ce grand creusement (profil 3 : C1), les fossés néolithiques de l'enceinte médiane ne sont plus visibles sur la carte magnétique (Figure 2.11d). Cette absence pourrait être liée à

l'épaisseur de sol importante dans cette zone qui est de l'ordre de 0,75 à 1 m (Figure 2.11c). Sur les profils 1 et 2 (Figure 2.12), les dépressions C1a-b sont associées à un replat et à une rupture de pente sur le MNS. Par contre, sur le profil 3, la dépression C1 est liée à une grande anomalie topographique positive ayant une forme bombée (surélévation d'environ 0,5 m). L'origine anthropique ou naturelle de cette anomalie est difficile à établir, notamment du fait de la proximité de l'ancienne ferme renseignée sur la carte d'état-major de la France (Figure 1.11 ; gravure de La Rochelle : 1845).

La géomorphologie superficielle du substrat (et les variations de l'épaisseur de sol qui en découlent) est donc un paramètre supplémentaire pour repérer les zones avec un potentiel de conservation du niveau d'occupation néolithique intéressant. La géomorphologie superficielle du substrat, l'épaisseur de sol et les cadastres anciens (proximité du niveau archéologique avec un chemin moderne dans le sondage) sont trois informations à croiser pour identifier les zones avec un fort potentiel de conservation de ce niveau. Par conséquent, les deux dépressions du substrat C1a-b sont très intéressantes pour les futures investigations archéologiques sur le site du Pontet (Figure 2.11a-c). De plus, même si l'enceinte médiane ne présente pas un aspect aussi monumental que l'enceinte externe, elle apparaît pourtant archéologiquement plus intéressante que cette dernière. L'intérêt de cette enceinte résulte donc de sa position dans une dépression du substrat (Figure 2.12 : profil 1 et 2) ; ce qui ne semble pas être le cas pour l'enceinte externe. Cependant, l'intérêt archéologique n'est pas discuté d'un point de vue général, mais seulement du point de vue de la conservation d'un niveau d'occupation néolithique.

L'intérêt archéologique de ces deux dépressions dans le substrat (C1 et C1a-b) est renforcé par la susceptibilité magnétique. La carte de la susceptibilité magnétique à large maille est illustrée sur la Figure 2.13. Elle a été acquise selon une maille de 20x20 m et ne représente que la susceptibilité magnétique des premiers centimètres du sol. Les susceptibilités les plus élevées ($> 1.10^{-3}$ SI) sont localisées dans la partie interne du site, au niveau des zones C2 (au sud), C1, C1a-b et R1. La susceptibilité magnétique est un marqueur de l'anthropisation du sol (Le Borgne, 1960, 1965 ; Tite et Mullins, 1971 ; Glaser et Birk, 2012 ; Hulin et *al.*, 2012). La localisation des plus fortes valeurs de susceptibilité magnétique au niveau de ces deux dépressions est un argument supplémentaire pour montrer leurs grands intérêts archéologiques.

Les faibles susceptibilités magnétiques sont localisées sur les versants de la petite vallée et sur le plateau calcaire à l'extérieur du site néolithique. Sur un sol calcaire, la concentration en carbonate est importante induisant une faible susceptibilité. Les versants sont associés à des formations de colluvions qui proviennent du plateau. Ils sont légèrement plus riches en carbonate (couleur blanchâtre du sol) d'où une susceptibilité magnétique plus faible sur les versants.

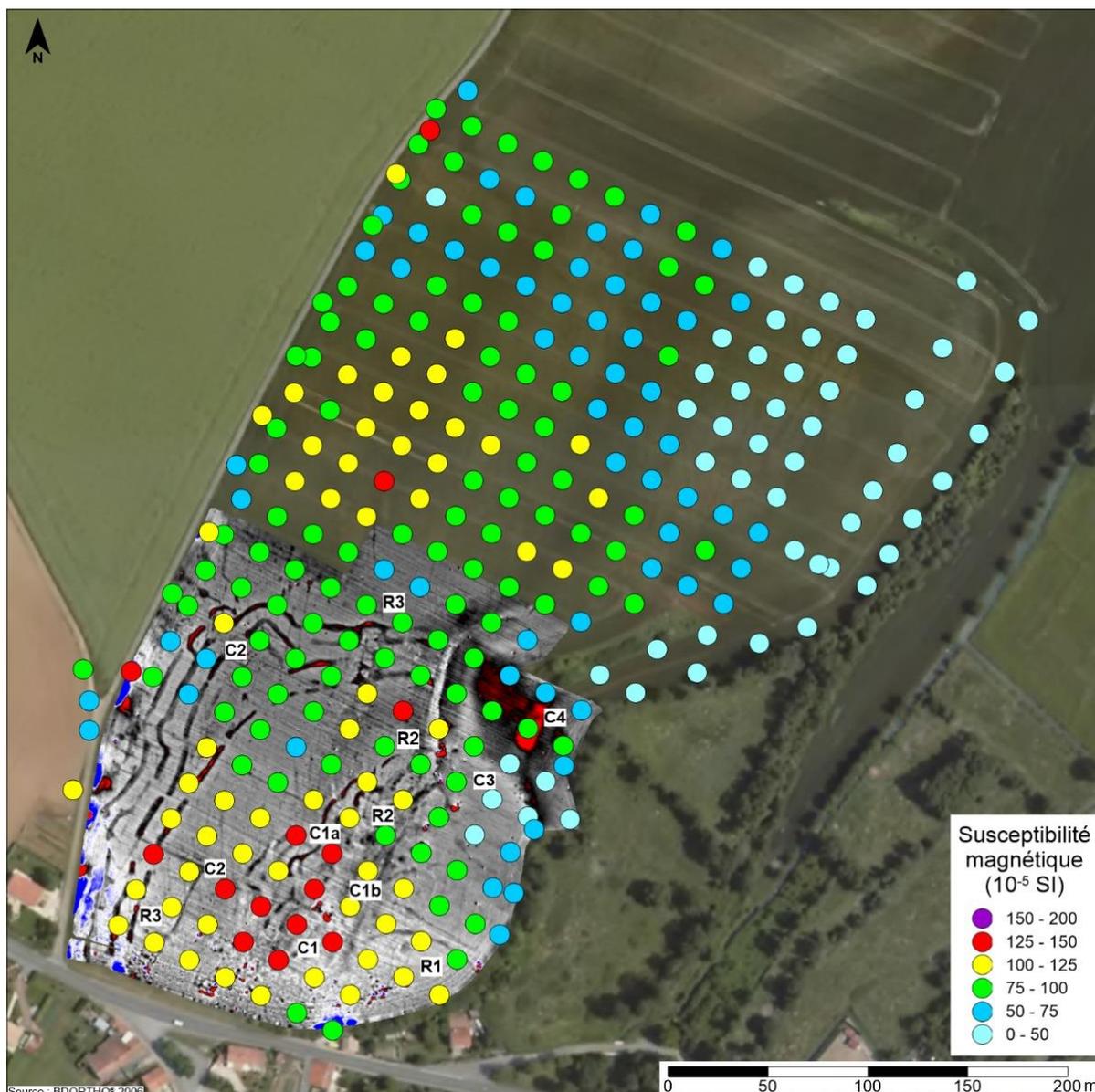


Figure 2.13 : Carte de la susceptibilité magnétique du site du Pontet. Échantillonnage des mesures selon une maille de 20x20 m.

2.2.6 Conclusions

La carte magnétique à haute résolution et haute précision de positionnement du Pontet présente l'organisation générale du site néolithique. Les cartes et les sections de résistivité ont fourni des informations complémentaires à la fois qualitatives et quantitatives sur la profondeur d'apparition du toit du substrat et sur les hétérogénéités du comblement des différents fossés de l'enceinte externe et médiane. Dans un contexte de préservation du patrimoine, une démarche méthodologique pour estimer le potentiel de conservation d'un niveau d'occupation néolithique a été effectuée en couplant les informations issues de disciplines différentes (données géophysiques, archéologiques et géotechniques, et prises de vue aériennes). Ce « potentiel » est donc une synthèse combinant des données quantitatives (épaisseur de sol mesuré et résistivité électrique) avec des interprétations archéologiques. La carte du

potentiel de conservation du niveau d'occupation néolithique localise les zones où la préservation de la stratigraphie (archéologique) est élevée. La démarche méthodologique pour aboutir à la carte de « potentiel archéologique » a supposé un substrat homogène. Cette hypothèse fût vérifiée en exploitant des prospections électromagnétiques à larges et plus fines mailles ainsi que des descriptions d'affleurements géologiques. Ceci a permis de confirmer la validité de la carte de l'épaisseur de sol recouvrant le substrat et donc de celle du potentiel de conservation du niveau d'occupation.

L'estimation de l'épaisseur de sol a été de nouveau exploitée pour obtenir un modèle de la géométrie du toit du substrat calcaire. Ce modèle permet de mieux comprendre le rôle de la géomorphologie superficielle du substrat dans la préservation du niveau archéologique. Cette approche fournit des informations supplémentaires pour contraindre les zones à fort potentiel de conservation, notamment au niveau de l'enceinte médiane du site.

Les prospections géophysiques et la démarche d'évaluation du potentiel de conservation du niveau d'occupation néolithique posent des bases solides pour l'étude archéologique du site. Les zones à fort intérêt archéologique ont été localisées de manière précise avec un minimum de destruction liée au sondage. Ces informations pourront ainsi être utilisées pour implanter précisément les futures investigations en fonction leurs problématiques. La démarche proposée est donc rentable et s'inscrit bien dans une politique de conservation du patrimoine car seulement 0,5 % du site a été fouillé.

2.3 EXTENSION DE LA CARTE MAGNÉTIQUE DU PONTET VERS LE NORD-EST

Afin de rechercher d'éventuelles structures néolithiques associées au site du Pontet, une extension vers le NE de la carte magnétique à haute résolution et haute précision de positionnement a été réalisée en octobre 2016. Pour étendre la carte magnétique du site vers le NE, des prospections magnétiques selon deux protocoles, un standard et un par positionnement DGPS, ont été réalisées. Ils recouvrent une surface totale de 5,84 ha (Figure 2.14). Trois magnétomètres ont été utilisés : le gradiomètre FEREX de type fluxgate (mesure du gradient de la composante verticale du champ magnétique total) et les magnétomètres G-858 et GSMP35-G en configuration de pseudo-gradient (mesure du gradient du champ magnétique total). Ces prospections magnétiques ont été aussi réalisées par les étudiants de Licence 3 de Sciences de la Terre de l'Université de La Rochelle.

La carte magnétique acquise avec le gradiomètre FEREX possède une maille de 0,5x0,1 m. Celle avec le magnétomètre G-858 a une maille de 1x0,1 m. Ces deux maillages sont valides dans leurs repères locaux. En effet, les deux cartes ont été géoréférencées pour acquérir une carte globale dans un repère géographique commun (taille des pixels : 0,1x0,1 m). Pour la carte magnétique acquise avec le GSMP35-G, les mesures magnétiques sont directement enregistrées dans un repère géographique et sont interpolées selon une maille de 0,1x0,1 m. L'algorithme d'interpolation pour les trois jeux de données magnétiques est le krigeage (Krige, 1951 ; Haas et Viallix, 1976 ; Hao et *al.*, 2012).



Figure 2.14 : Synthèse des emprises des prospections magnétiques réalisées en complément de la carte magnétique (réduite au pôle) du site néolithique du Pontet.

Les trois cartes magnétiques sont illustrées sur la Figure 2.15. La partie extérieure de la carte de synthèse présente deux zones distinctes : une zone NW et une SE séparées par l'isohypse 14 m NGF. La partie NW (T) montre de nombreuses anomalies linéaires de faible à moyenne intensité magnétique (de 1 à 5 nT/m) orientées N-S et NW-SE et offre un aspect bruité. La partie SE présente quelques anomalies linéaires de faible intensité orientée N-S et n'est pas bruitée. Les linéations orientées NW-SE sont principalement liées à l'acquisition.

Les anomalies orientées N-S correspondent à des diaclases et celles rectilignes sont associées à des parcelles. La partie SE de l'extension de la carte magnétique présente trois anomalies magnétiques P, R et N. La première (P) est composée de deux anomalies linéaires orientées NE-SW ayant une forme rectangulaire de dimension de 20 m de long pour 6 m de large. L'anomalie R, de forme circulaire de diamètre 4 m, est localisée au niveau du vallon débouchant dans la petite vallée du Grand Écours. Cette anomalie pourrait être associée à une fosse dont la période chronologique est indéterminée. Plusieurs petites anomalies ponctuelles (N) de forte intensité (environ 10 nT/m) sont regroupées au niveau de ce même vallon et semblent présenter une forme rectangulaire.

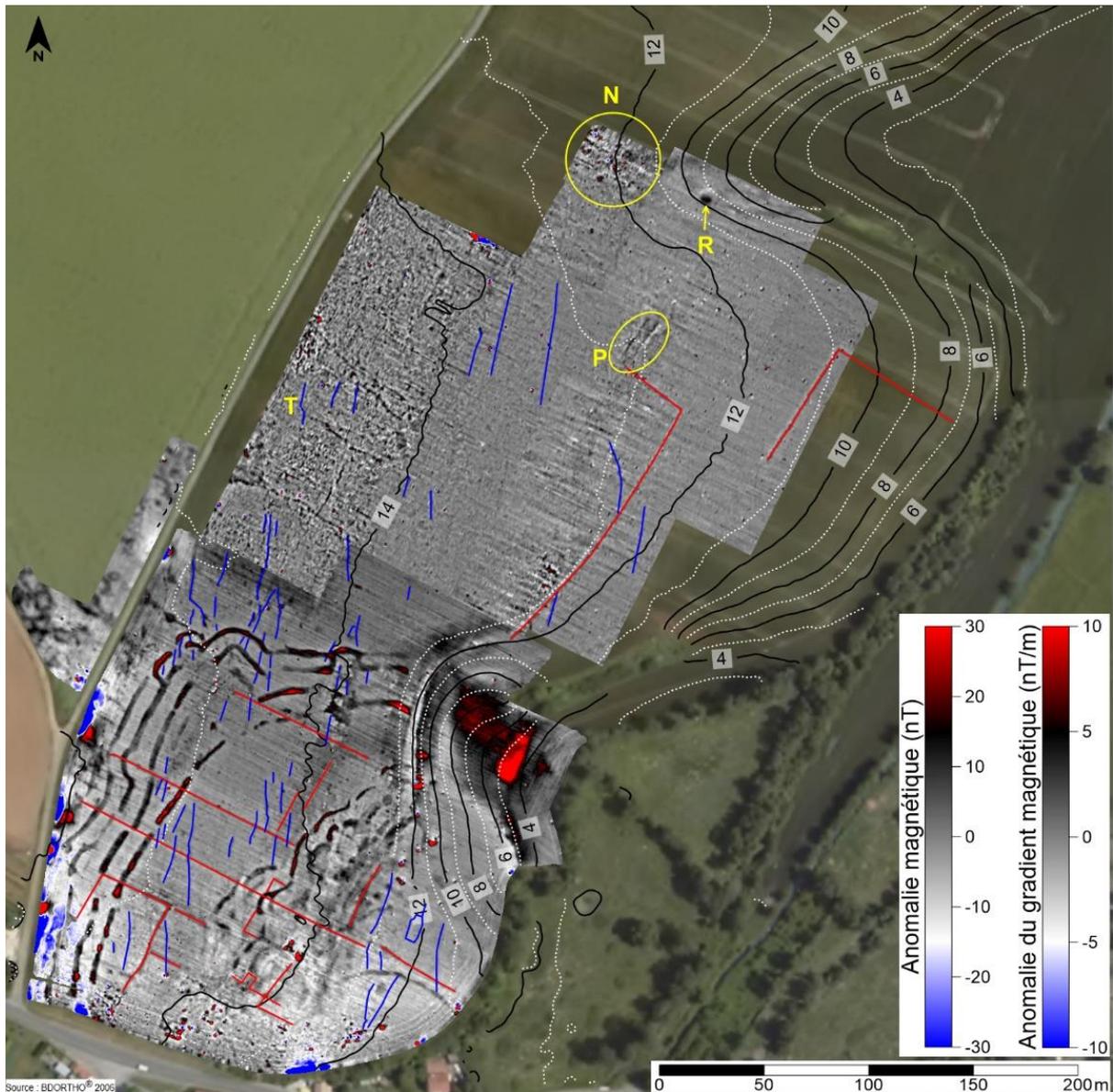


Figure 2.15 : Extension de la carte magnétique du Pontet avec annotations superposée aux isohypses d'altitude à 1 m. Les diaclases (bleu) et les parcelnaires (rouge) sont identifiés sur l'extension.

Les anomalies magnétiques P, R et N sont confrontées aux parcelnaires et aux bâtiments anciens afin de vérifier s'ils ne correspondent pas à des structures modernes. La Figure 2.16 présente la superposition de l'extension de la carte magnétique avec le plan cadastrale et les bâtiments de 1824 (Saint-Nazaire-sur-Charente, section B8). Les autres cadastres se superposent plus ou moins bien à celui de 1824, suffisamment explicite. Dans la partie NE de la carte, la zone plus bruitée (T) est encadrée par des limites cadastrales (ce constat est aussi valide pour les parcelnaires plus récentes). Les anomalies linéaires de faible à moyenne intensité orientées NW-SE possèdent une orientation similaire à certains parcelnaires et semblent être dans la continuité de ces derniers. De ce fait, ces anomalies sont liées à des parcelnaires récents. C'est le même constat pour la structure P qui est dans l'alignement du parcelnaire de 1824. Les petites anomalies ponctuelles regroupées, dont la structure N, sont parfaitement superposées à une ancienne ferme renseignée sur le plan cadastrale. Cette structure est probablement

une trace de ce bâtiment. La proximité de la supposée fosse R avec la structure N plaide plutôt en faveur d'une fosse moderne.

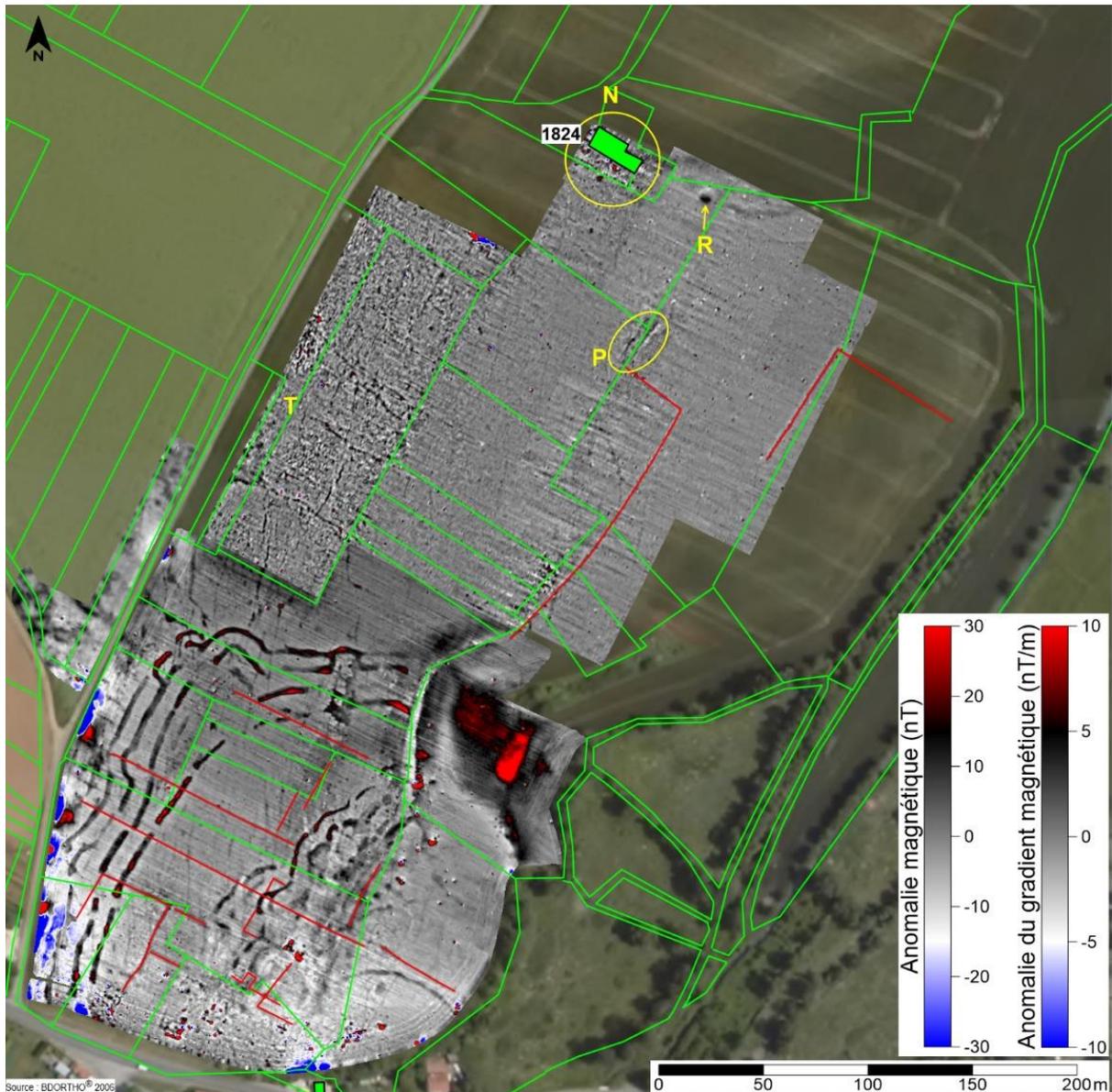


Figure 2.16 : Extension de la carte magnétique du Pontet superposée au cadastre de 1824.

L'extension de la carte magnétique du Pontet ne semble pas présenter de structure archéologique pouvant être associées au site néolithique. Elle met principalement en évidence des structures récentes associées à du parcellaire et à une ancienne ferme, ainsi que des diaclases fracturant le substrat calcaire.

3 CONCLUSIONS GÉNÉRALES

La prospection magnétique du site du Pontet a été réalisée avec un protocole original, couplant une station totale et un magnétomètre, permettant de détecter des anomalies significatives de faible intensité (0,1 nT). La carte magnétique est de grande qualité avec une haute résolution spatiale (30 mesures par m²) et une haute précision de positionnement des mesures (pluri-centimétrique). La

répétabilité de ce protocole a pu être testée et validée sur un autre site de la même période chronologique : l'enceinte néolithique de la Garenne. Dans un premier temps, la similitude entre les deux sites (en termes de sol, de substrat et de structures archéologiques) était nécessaire pour s'affranchir au maximum des effets de site. La prochaine étape de validation du protocole sera donc une prospection sur un site dans un contexte environnemental et/ou archéologique différent.

La carte magnétique du Pontet a mis en évidence l'organisation générale du site néolithique. Les anomalies magnétiques « non-archéologiques », comme les diaclases et les parcelles, ont été différenciées des structures néolithiques. Cette différenciation est basée sur des orientations préférentielles des anomalies et la comparaison avec des documentations historiques. Après cette phase interprétative, des prospections électriques (carte et section) ont été réalisées sur des zones particulières du site pour apporter des informations complémentaires. Sur cette base de travail, un sondage archéologique a été réalisé au niveau de quatre anomalies magnétiques circulaires correspondant à de possibles fosses néolithiques. Cette ouverture a permis de comprendre l'origine des anomalies magnétiques et électriques identifiées. Les résultats de la fouille ont mis en évidence la conservation d'un niveau d'occupation néolithique. De cette découverte, un protocole a été développé pour identifier les zones à l'échelle du site où ce niveau d'occupation serait potentiellement conservé. Cette démarche a nécessité la compilation des données archéologiques, géophysiques, géotechniques et d'imagerie aérienne.

Les protocoles et démarches méthodologiques mises en place durant cette thèse ont été développés selon deux objectifs principaux. Le premier est la cartographie du site avec une bonne précision et une résolution spatiale permettant d'identifier les plus petites structures (trous de poteau inférieurs à 40 cm de diamètre). Le second est de localiser les zones où un niveau d'occupation est le plus susceptible d'être préservé. Ces aspects offrent une très bonne base de travail pour les investigations archéologiques futures. Elles permettront notamment de localiser les futurs sondages suivant les problématiques archéologiques associées.

Le chapitre suivant se focalise sur les prospections géophysiques effectuées pour décrire et comprendre l'environnement passé et présent du site. Ces travaux s'inscrivent dans une approche paléogéographique de cet environnement. Ils doivent servir de base pour l'implantation de carottages paléoenvironnementaux. La démarche de travail est donc similaire à celle évoquée précédemment mais elle est appliquée à une plus large échelle, avec des méthodes géophysiques adaptées.

CHAPITRE V

-

**Prospections géophysiques appliquées à la
reconstitution paléogéographique**

-

**Implantation de carottages
paléoenvironnementaux**

Ce chapitre de la thèse est consacré à une démarche méthodologique pour positionner des carottages paléoenvironnementaux en lien avec une étude de l'environnement d'un site archéologique. Cette démarche utilise des prospections géophysiques multi-méthodes et multi-échelles pour obtenir un modèle préliminaire de la paléogéographie de la zone d'étude. Une approche cartographique (2D horizontale) et stratigraphique (1D et 2D verticales) par des prospections géophysiques offre une première représentation des contrastes sédimentaires de la subsurface. Sur cette base, une zone cible est désignée pour l'implantation de carottages paléoenvironnementaux. La confrontation entre les résultats des analyses des carottes et des données géophysiques permettra de mieux interpréter ces dernières et d'améliorer la compréhension des sources à l'origine des anomalies mesurées. Ceci permettra aussi de discuter de l'efficacité d'une approche préliminaire de la paléogéographie par la géophysique comme démarche pour implanter des carottages.

Deux zones d'étude ont été sélectionnées pour l'évaluation de cette démarche : le site néolithique du Pontet et les ports antiques de Narbonne. Ces zones sont dans des environnements littoraux (sédimentaires) et dans des contextes archéologiques différents (cf. Chapitre II). Autre différence notable, les deux zones d'étude ne sont pas à la même échelle (Figure A). En effet, l'étude paléogéographique sur Le Pontet est limitée à une vallée longue d'environ 1,3 km, et dont la superficie avoisine les 50 ha. Pour Narbonne, le secteur de recherche s'étend sur environ 6 km de long avec une emprise de l'ordre de 370 ha. Il y a un facteur 7 entre les étendues de ces deux zones d'étude. Ceci offre la possibilité de discuter de l'efficacité d'une approche paléogéographique par la géophysique en fonction de l'emprise de la zone d'étude.

Dans un premier temps, chaque zone sera traitée indépendamment l'une de l'autre. Les résultats des prospections géophysiques seront présentés et discutés. Ils seront ensuite confrontés aux carottes. Cette confrontation entre les données électriques issues des sections de résistivité et de la diagraphie électrique avec les résultats des carottes permettra de discuter de la véracité du modèle de subsurface proposé par les sections électriques. Cette mise en relation est nécessaire pour interpréter les anomalies électriques en tant que structures sédimentaires. Dans un second temps, une synthèse des résultats entre les deux sites sera effectuée afin de discuter des apports de cette démarche méthodologique en tant qu'approche préliminaire pour une étude paléogéographique et paléoenvironnementale.

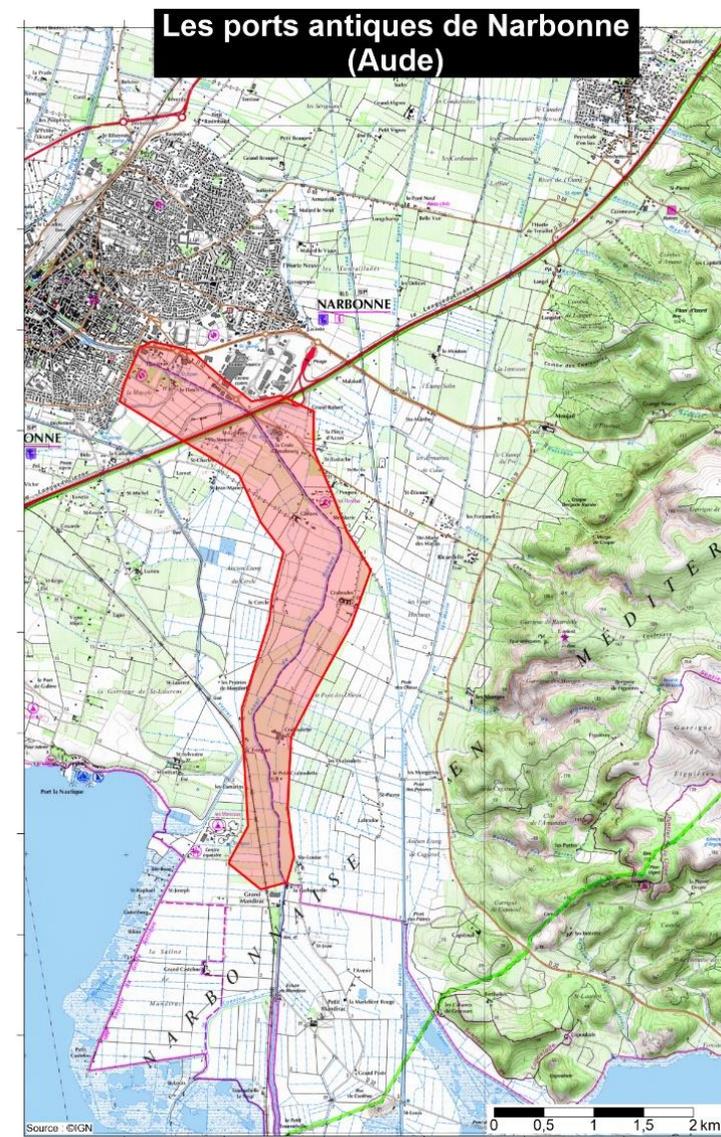
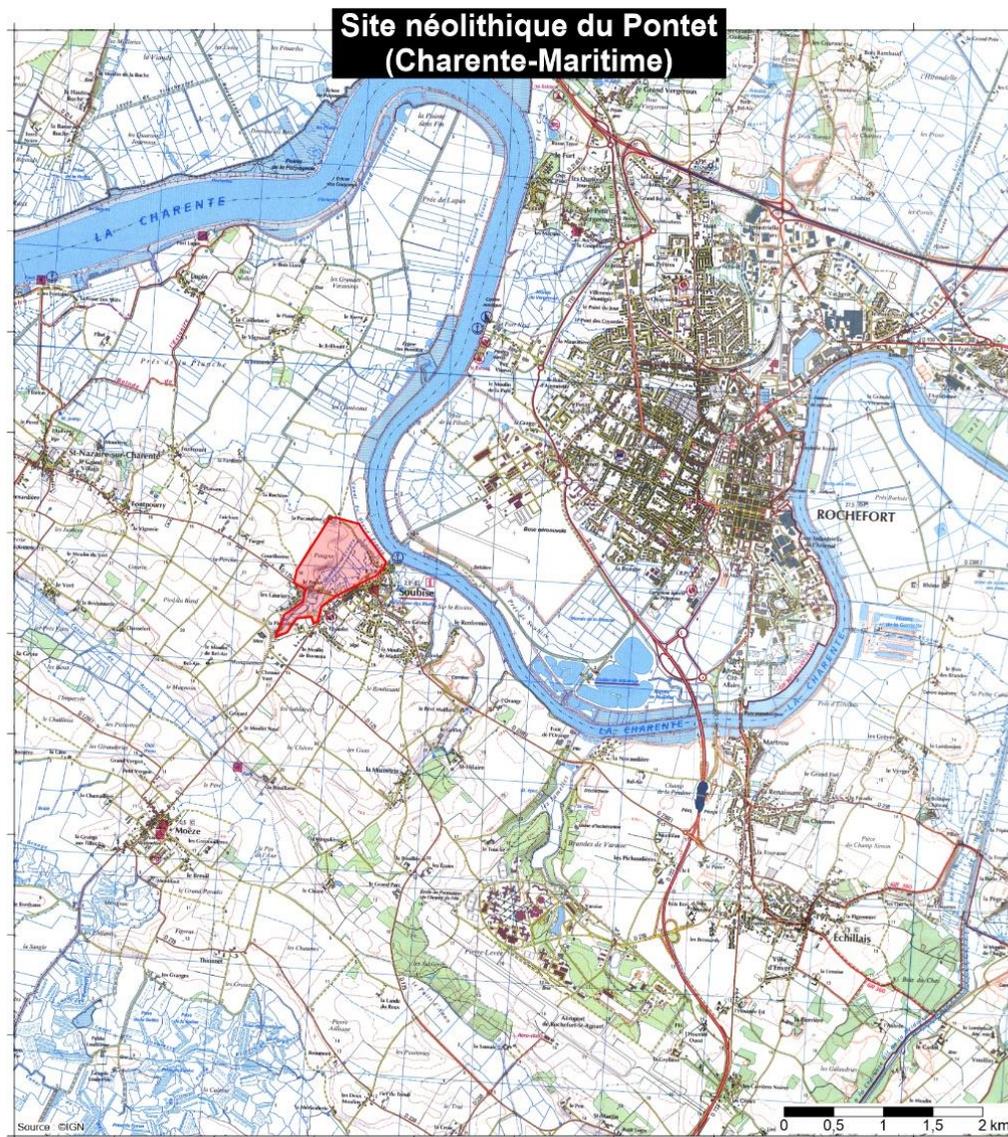


Figure A : Carte topographique des deux zones d'étude (polygones rouges) à la même échelle spatiale. Site du Pontet : surface d'environ 50 ha. Zone de Narbonne : surface d'environ 370 ha.

1 APPROCHE PALÉOGÉOGRAPHIQUE DU SITE DU PONTET

L'enceinte néolithique du Pontet, étudiée précédemment (cf. Chapitre IV), est implantée sur le plateau calcaire de la vallée du Grand Écours, dont les versants sont des falaises et des paléo-falaises (Figure 1.1a). Le modèle numérique de surface (MNS) montre les contrastes topographiques entre la platitude de la partie basse et le plateau de la vallée avec les reliefs abrupts des versants. La vallée est longue de 1,3 km pour une largeur moyenne en aval de 550 m et en amont de 100 m. Elle a sûrement été incisée au cours du Pléistocène (Laporte et *al.*, 2009b) et plusieurs petites incisions sur les versants (cours secondaires) sont présentes. Le plateau calcaire de ce vallon culmine entre 12,5 et 20 m NGF et la partie basse est une zone humide ne dépassant pas l'altitude de 3 m NGF.

1.1 CARTE DE LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE APPARENTE

La prospection électromagnétique couvre une surface de 34 ha, soit plus de la moitié de la vallée. Elle a été réalisée à l'EM31-MK2 (profondeur d'investigation comprise entre 1,5 et 5 m). La carte résultante est à large maille et décrit les variations spatiales de la conductivité électrique apparente (CEa) du plateau et des versants calcaires ainsi que la partie basse de la vallée. Les anomalies de CEa sont liées à des contrastes lithologiques et hydrogéologiques. Les contrastes lithologiques sont majoritairement associés à la transition entre le fond de vallée et les versants. Les contrastes hydrogéologiques correspondent à des effets de drainage à proximité des canaux (Camus, 2008 ; Camus et *al.*, 2011).

Comme la carte de CEa couvre l'ensemble des composantes géographiques de la vallée (plateau, versants, partie basse) et qu'un modèle numérique de surface (MNS) à haute résolution est disponible (lidar), l'échelle de couleur de la CEa a été adaptée en fonction du relief. Sur la Figure 1.2, la relation entre la CEa et la topographie se décompose en deux ensembles : le premier correspond à la partie basse de la vallée (faible variation de l'altitude et forte variation de la CEa) et le deuxième caractérise le plateau et le versant (forte variation de l'altitude et faible variation de la CEa). De cette observation, les gammes de couleurs de la CEa sont classées en tenant compte de la morphologie de la zone. Deux profils topographiques jumelés à des profils de CEa sont présentés (les profils 1 et 2 sont localisés sur la Figure 1.1b). Cet affrontement avec la topographie permet de traduire les composantes du relief au travers de la CEa (en plus de ces variations liées aux contrastes lithologiques et hydrogéologiques) :

- Les CEa inférieures à 30 mS/m (noir à rouge) correspondent au plateau et haut de versant ;
- Les CEa comprises entre 30 et 100 mS/m (jaune à bleu clair) caractérisent le versant ;
- Les CEa supérieures à 100 mS/m correspondent au fond de vallée (partie basse).

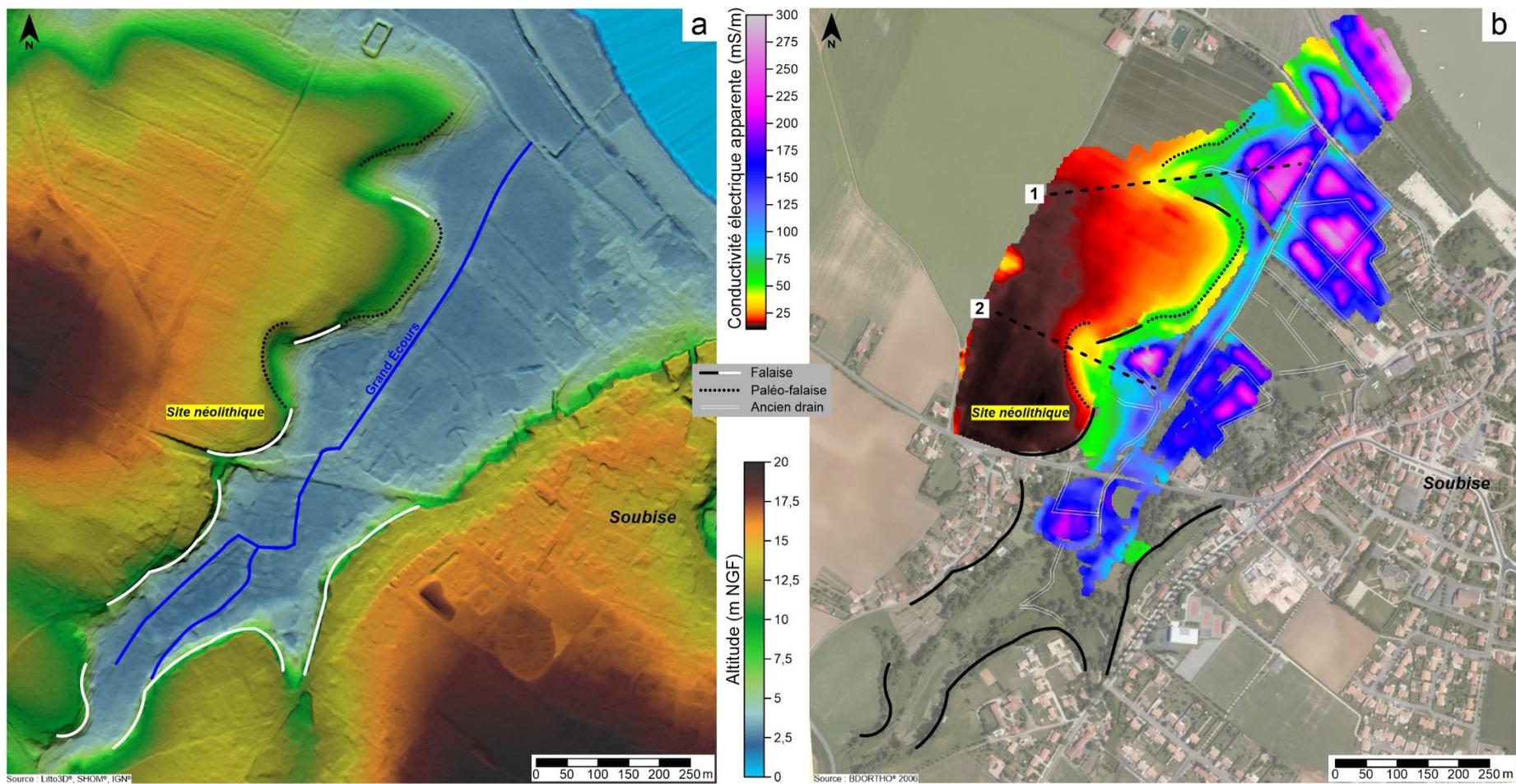


Figure 1.1 : La vallée du Grand Écours. (a) Modèle numérique de surface issu du produit Litto3D®. (b) Carte de la conductivité électrique apparente à large maille.

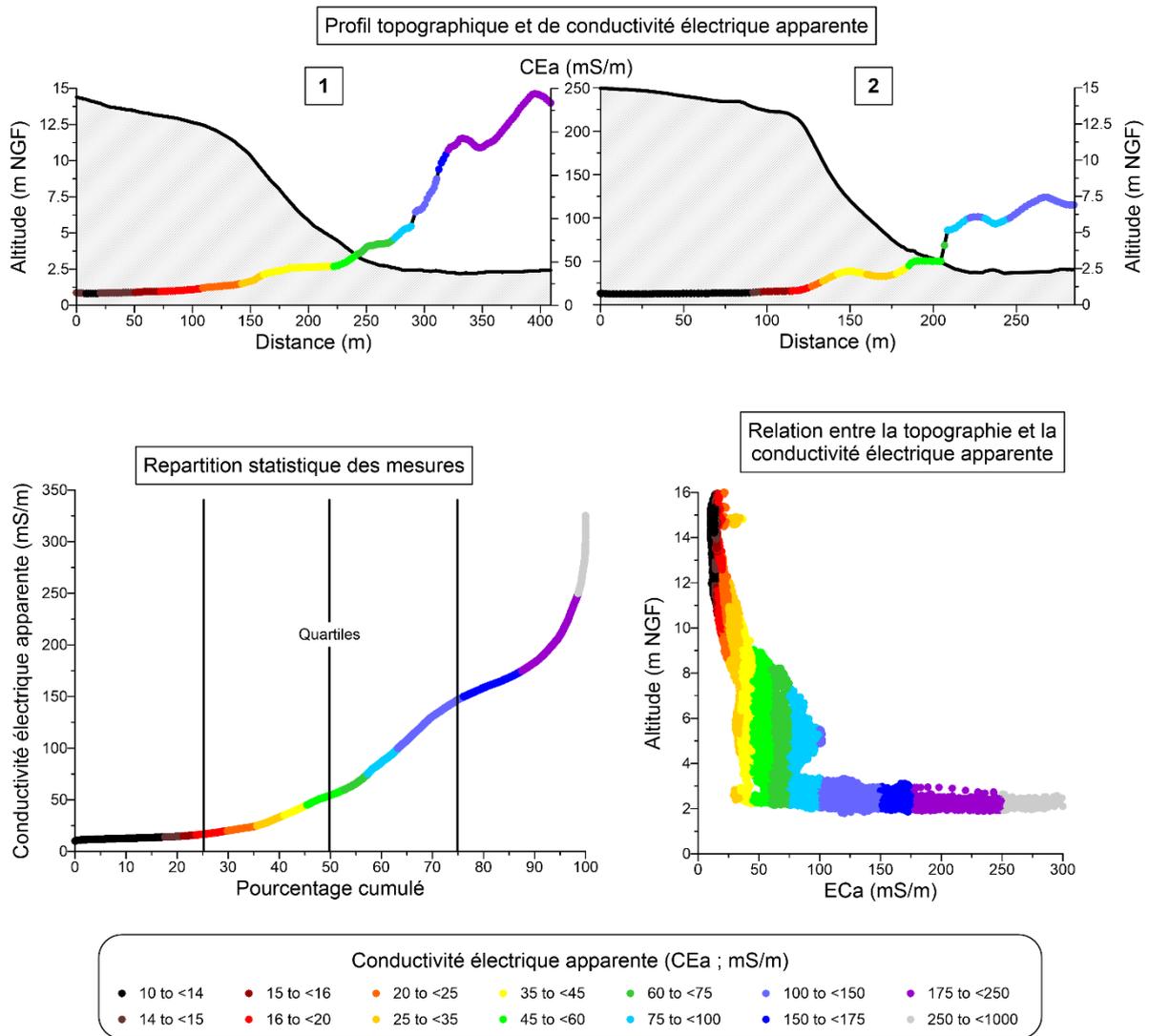


Figure 1.2 : Adaptation de l'échelle de couleur de la carte de conductivité électrique apparente avec la topographie.

La répartition des CEa et leurs interprétations ont déjà été discutées dans le Chapitre IV (partie 2). En résumé, la partie basse (CEa > 100 mS/m) correspond à des alluvions fines fluvio-marines (Bri). Les versant et le plateau (CEa < 100 mS/m) sont composés par des calcaires du Turonien inférieur et moyen. La couche plus conductrice sur les versants (CEa comprise entre 50 et 75 mS/m) correspond au niveau de marne de la base du Turonien inférieur.

La partie basse de la vallée présente des anomalies rectilignes plus résistantes (100 à 175 mS/m). Elles se superposent parfaitement aux anciens fossés de drainage, vectorisés à partir d'images aériennes anciennes. Les CEa du fond de vallée dépassent largement les 100 mS/m, voire les 250 mS/m, signifiant que la conductivité sous-évaluée, liée à la rupture de l'approximation du LIN (McNeill, 1980 ; Beamish, 2011). Ces valeurs traduisent un sol et un sédiment avec une salinité élevée : ceci est cohérent avec l'influence marine dans la sédimentation du Bri (Ladouche et Weng, 2005). Comme les fossés de drainage sont des canaux d'eau douce, la salinité du sédiment à proximité diminue par diffusion. De ce fait, la CEa est plus faible à proximité des canaux et des anciens fossés de drainage (Camus, 2008 ;

Camus *et al.*, 2011). La carte de CEa met ainsi en évidence des « drains fantômes ». À la périphérie des canaux actuels, l'effet de drainage fait décroître les conductivités jusqu'à environ 50 mS/m, pour un sédiment environnant avec des conductivités supérieures à 200 mS/m.

Hormis ces effets de drainage, le fond de vallée correspond à une zone humide vraisemblablement associée à des alluvions fines (Bri) et une salinité élevée. La carte de CEa montre une partie basse homogène sans anomalie de conductivité particulière. Les ECa ne semblent pas varier d'amont en aval. Comme discuté ultérieurement (Chapitre IV, partie 2), le plateau calcaire est géologiquement homogène, hormis la couche plus conductrice des *Marnes à Exogyra columba gigas* (Bourgueil *et al.*, 1972). De part ces informations, des sections de résistivité électrique ont été positionnées afin d'apporter une vision stratigraphique de la vallée.

1.2 SECTIONS DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

Les sections électriques ont été positionnées sur la base de la carte de CEa et de manière à ce qu'elles se recoupent entre-elles. Ainsi, 14 sections, avec un écartement de 2 m inter-électrodes, ont été effectuées : huit sections implantées dans la partie aval de la vallée (à proximité de la Charente) et six dans la partie centrale (Figure 1.3). La double configuration Wenner-Schlumberger et dipôle-dipôle a été utilisée pour effectuer les pseudosections, sauf pour la section 5 (Wenner-Schlumberger uniquement). L'échelle de couleur de la résistivité électrique est calibrée à partir de la répartition statistique des valeurs sur l'ensemble des sections.

1.2.1 La partie aval de la vallée

Les sections électriques de la partie aval sont présentées sur les Figure 1.4, 1.5 et 1.6. Les sections 1, 2, 3 et 4 (Figure 1.4), orientées WNW-ESE, et la section 6 (Figure 1.6), orientée NW-SE, sont orthogonales au talweg de la vallée (NE-SW). Les sections 7 et 8, orientées SSW-NNE, recoupent les précédentes et sont parallèles au talweg. La section 5 (Figure 1.5), orientée NNW-SSE, est positionnée en travers d'une incision secondaire du versant et de la paléo-falaise.

La section 6 (Figure 1.6) est la plus longue (574 m). Elle traverse l'ensemble du fond de vallée, du versant nord et d'une partie du plateau calcaire. Elle est donc prise comme référence pour caractériser l'ensemble des anomalies électriques de la subsurface. L'angle moyen de la pente du versant a été mesuré afin de quantifier l'écart théorique de la position des électrodes avec le plan horizontal (erreur sur le facteur géométrique, cf. Chapitre III). Par trigonométrie, cet écart est de 4 cm pour un angle de 11,3° (pente de 20 %) et représente moins de 10 % de l'écartement inter-électrodes de 2 m (Zhou et Dahlin, 2003). Son influence sur la mesure de la résistivité apparente est supposée négligeable.

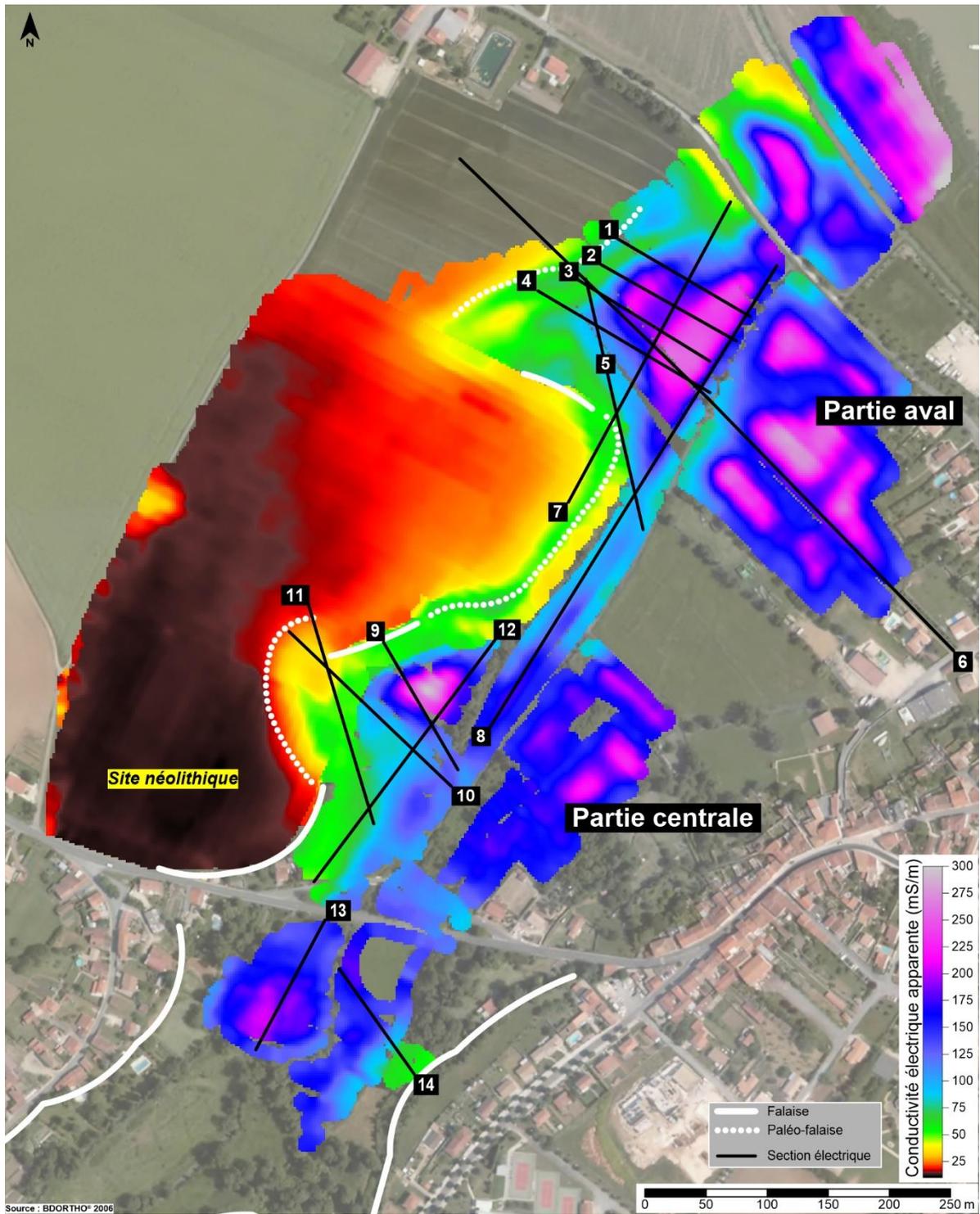


Figure 1.3 : Localisation des sections de résistivité électrique sur la carte de la conductivité électrique apparente. Les étiquettes numérotées des sections sont placées sur leurs positions zéro (sauf pour la section 5 où sa position zéro est proche de l'étiquette de la section 3).

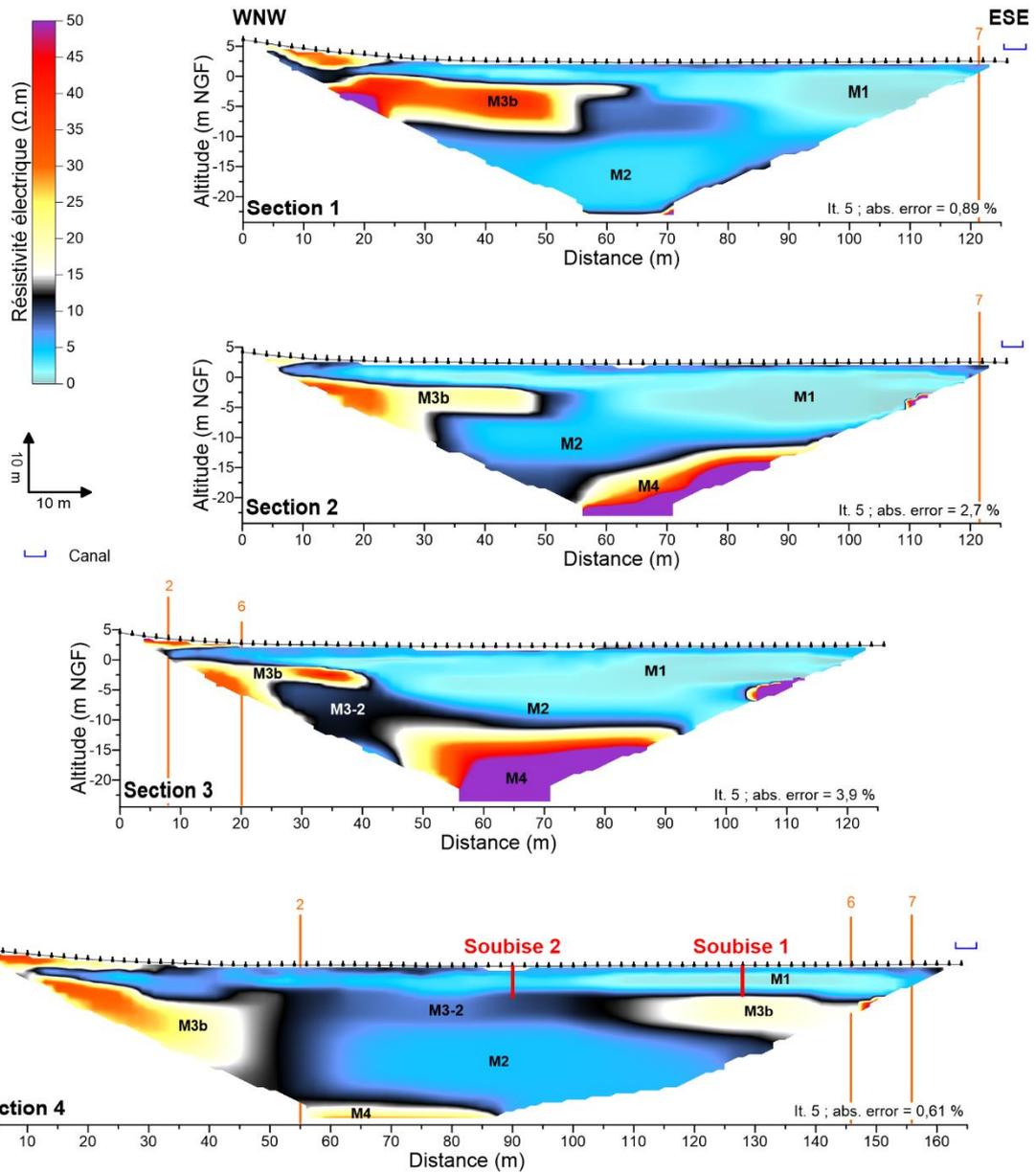


Figure 1.4 : Sections de résistivité électrique de la partie aval de la vallée. La position des carottages Soubise 1 et 2 est indiquée par deux traits rouges mis à l'échelle.

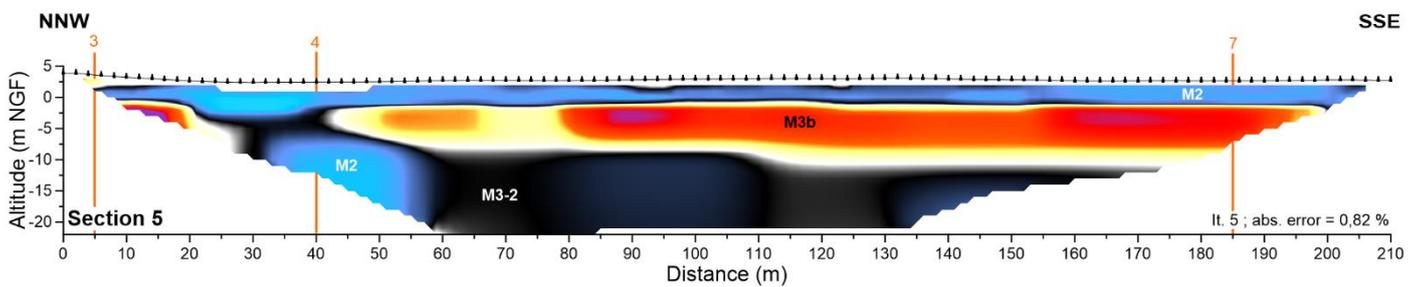


Figure 1.5 : Sections de résistivité électrique de la partie aval de la vallée.

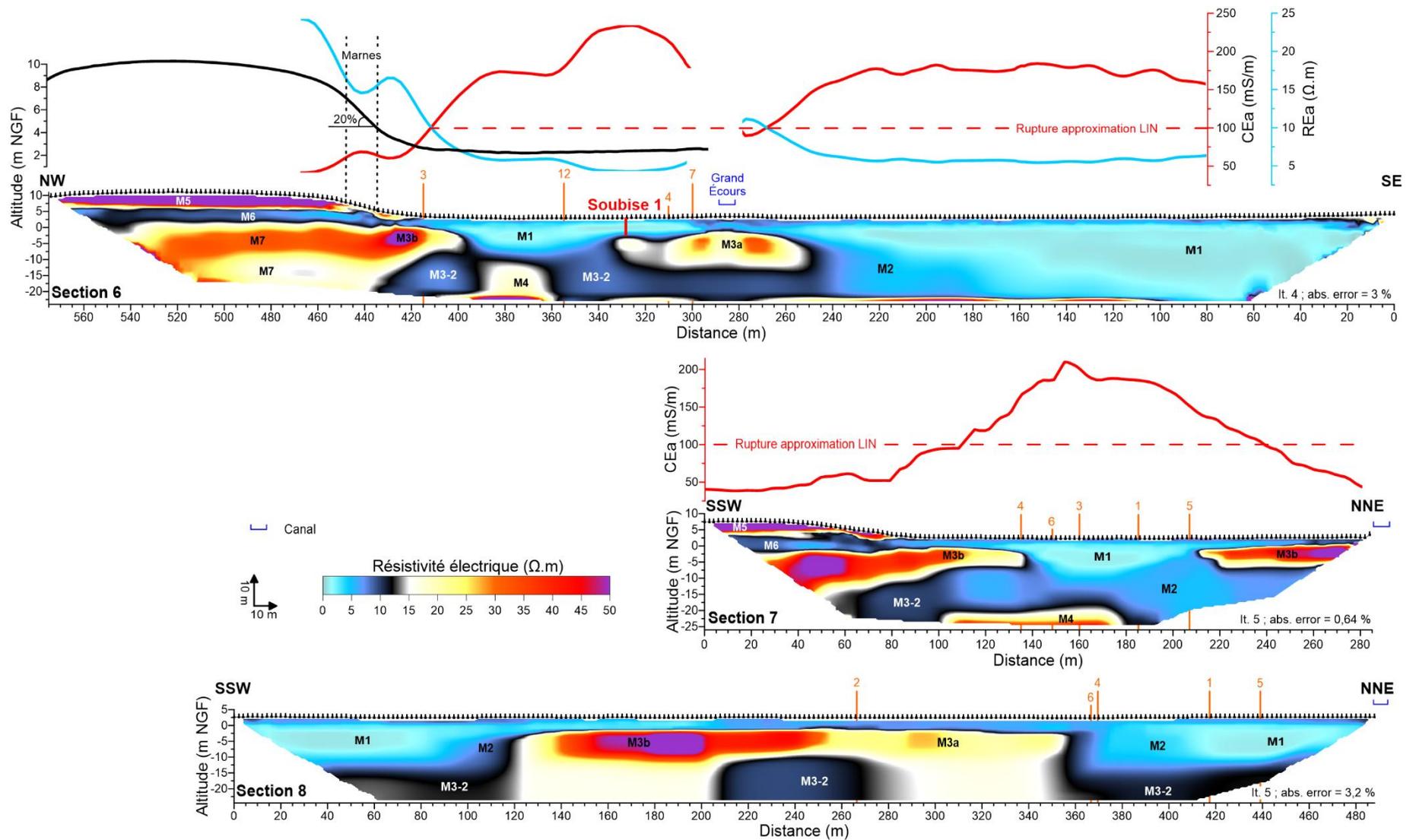
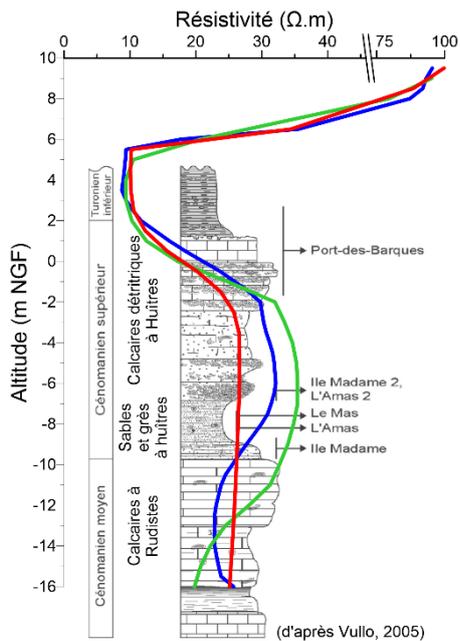


Figure 1.6 : Sections de résistivité électrique de la partie aval. Les sections 6 et 7 sont couplées avec des profils de conductivité électrique apparente (CEa) extrait de la carte de CEa (Figure 1.3). Le profil de résistivité apparente (REa) de la section 6 résulte de la conversion du profil de CEa. Le carottage Soubise 1 est indiqué et mis à l'échelle sur la section 6, sa position est projetée orthogonalement (distance entre Soubise 1 et la section 6 : 8 m)

La section 6 (Figure 1.6) montre que le comblement de la vallée est caractérisé par des milieux plus conducteurs M1 ($< 1,5 \Omega.m$) et M2 (entre $1,5$ et $7 \Omega.m$). Le plus conducteur (M1) est présent au cœur de la vallée et le plus résistant (M2) borde le milieu M1 en profondeur et en surface. Les résistivités sur cette section (pour les cinq premiers mètres) sont cohérentes avec le profil de conductivité (et de résistivité) extrait de la carte. Les fortes variations de CEa sur le profil (position 320 m et 400 m) sont corrélables avec la présence du milieu plus conducteur (M1) en surface jusqu'à -9 m NGF. Dans la partie SE, la conductivité apparente est légèrement plus faible car la section est localisée sur un « drain fantôme » (Figure 1.3). Au niveau du Grand Écours (Figure 1.6), l'effet de drainage est visible à la fois sur le profil de conductivité et sur la section. Sur cette dernière, la résistivité augmente aux abords du canal. Il est possible que l'anomalie plus résistante M3a, sous le Grand Écours, soit liée au drainage.

Les deux milieux plus conducteurs (M1 et M2) se retrouvent sur les autres sections parallèles (section 1, 2, 3 et 4 ; Figure 1.4) et orthogonales à la section 6 (sections 7 et 5 ; Figure 1.6). Sur les sections 2, 3, 6 et 7, des anomalies plus résistantes (M4) sont présentes dans le fond de la vallée (Figure 1.4, 1.5 et 1.6). Ces anomalies (M4) sont supérieures à $15 \Omega.m$ et pourraient correspondre au substrat. En effet, la gamme de résistivité est semblable à celle qui caractérise le plateau calcaire sur la section 6 (Figure 1.6). S'il s'agit du substrat, alors le comblement sédimentaire possède une puissance de 15 à 25 m. Il apparaît comme un environnement homogène avec des variations de résistivité très diffuses (M1 vers M2). Ces milieux plus conducteurs M1 et M2 correspondent aux alluvions fines (Bri). La carte de CEa montre ainsi leur extension spatiale (Figure 1.3). Les faibles résistivités de M1 et M2 ne laissent pas de doute sur la salinité élevée l'eau interstitielle du sédiment. À proximité du substrat (M4), la résistivité est légèrement plus élevée (7 à $15 \Omega.m$) et correspond au milieu M3-2. Celui-ci semble correspondre à un sédiment plus riche en carbonate apporté par l'érosion du substrat.

La partie NW de la section 6 met en évidence la relation entre le versant et le comblement du fond de vallée ainsi que les anomalies électriques composant le substrat. Au niveau de la base des sections 6 et 7, le contact entre le substrat (M5, M6 et M7) avec les alluvions fines (M1 et M2) est quasi-vertical, indiquant la position de la paléo-falaise (position approximative : 440 m). En surface, le substrat correspond à un milieu plus résistant et supérieur à $50 \Omega.m$ (M5), reposant sur une couche horizontale plus conductrice d'environ $10 \Omega.m$ (M6). Sur le versant, cette couche affleure et elle est associée à celle identifiée sur la carte et le profil de CEa (Figure 1.3 et 1.6). Elle correspond aux marnes du Turonien inférieur qui apparaissent comme une couche horizontale sur la section 6 (Figure 1.6). Son épaisseur est d'environ 6 m et son toit se trouve à une altitude d'environ 6 m NGF. L'ensemble M5 et M6 représente la formation du Turonien inférieur composée par les *Marnes à Exogyra columba gigas* et les *Calcaires à Céphalopodes* (Bourgueil et al., 1972 ; Moreau et Platel, 1982). Cet ensemble se retrouve aussi sur la section 7. Ces formations géologiques correspondent aux affleurements du substrat, visibles sur les falaises calcaires (cf. Chapitre IV, partie 2). Par conséquent, les formations du Cénomaniens forment la



Profil de résistivité extrait de la Section 6 :

- Modèle : Wenner-Schlumberger - Dipôle-dipôle
- Modèle : Wenner-Schlumberger
- Modèle : Dipôle-dipôle

Figure 1.7 : Log stratigraphique synthétique des formations marno-calcaires du Cénomaniens moyen et supérieur et marneuses du Turonien inférieur.

partie sous-jacente. Elles sont caractérisées par un milieu plus résistant (M7) composé d'une anomalie comprise entre 15 et 25 $\Omega.m$, et d'une autre entre 30 et 40 $\Omega.m$. Le Cénomaniens est affleurant sur différentes falaises dans la région, notamment à Port-des-Barques et l'Île Madame (Bourguet *et al.*, 1972 ; Perrichot, 2003 ; Vullo, 2005). La synthèse stratigraphique des formations du Cénomaniens moyen et supérieur (Vullo, 2005) est présentée sur la Figure 1.7 et jumelée avec des profils verticaux extraits de la section 6 (position 500 m) pour les trois modèles de résistivité (Wenner-Schlumberger, dipôle-dipôle et la configuration double). Le log est calé aux profils électriques à partir de la base du niveau marneux du Turonien inférieur (niveau repère à l'échelle du site). Comme le log a été édifié à partir d'observation sur plusieurs affleurements, l'échelle verticale n'est pas absolue et doit être prise à titre indicative. Les formations du Cénomaniens moyen et supérieur sont essentiellement

des calcaires avec un niveau sableux d'une puissance de l'ordre de 2 m. Compte-tenu de sa profondeur approximative à 16 m sous la surface, il est peu envisageable qu'il soit détectable par la section. De ce fait, la couche plus résistante sur les profils électriques (et la section 6) du dipôle-dipôle et la configuration double n'est pas associable avec ce niveau sableux. De plus, le modèle Wenner-Schlumberger ne le détecte pas. Comme la configuration Wenner-Schlumberger est plus sensible aux variations verticales de résistivité que le dipôle-dipôle (Dahlin et Zhou, 2004 ; Samouëlian *et al.*, 2005), il est fort probable que cette couche ne traduise pas une entité géologique. Il pourrait s'agir d'un artefact d'inversion du dipôle-dipôle.

Jouxtant la paléo-falaise, une anomalie résistante de forme allongée (M3b) est intercalée dans les milieux plus conducteurs M1 et M2. Elle possède une signature électrique proche de celle du substrat calcaire (M7), c'est à dire comprise entre 15 et 40 $\Omega.m$. Cette dernière pourrait donc correspondre à un dépôt d'abrasion de la paléo-falaise calcaire. Cette anomalie (M3b) est présente sur les sections 1, 2, 3 et 4 (Figure 1.4). Ces dernières montrent qu'elle n'est pas géométriquement homogène. Ce présumé dépôt d'abrasion est présent sur l'ensemble du versant de la partie aval de la vallée : il est identifié sur les sections 5, 7 et 8 (Figure 1.5 et 1.6). Sur la carte de CEa (Figure 1.3), la géométrie resserrée des zones très conductrices (> 250 mS/m) au niveau des sections 1, 2, 3, 4 et 7 est vraisemblablement liée à la présence de cette anomalie (M3b) accolée à la paléo-falaise. Le profil de conductivité de la section 7

confirme cette relation car la conductivité décroît progressivement (en direction du centre de la section) au-dessus de cette anomalie (M3b).

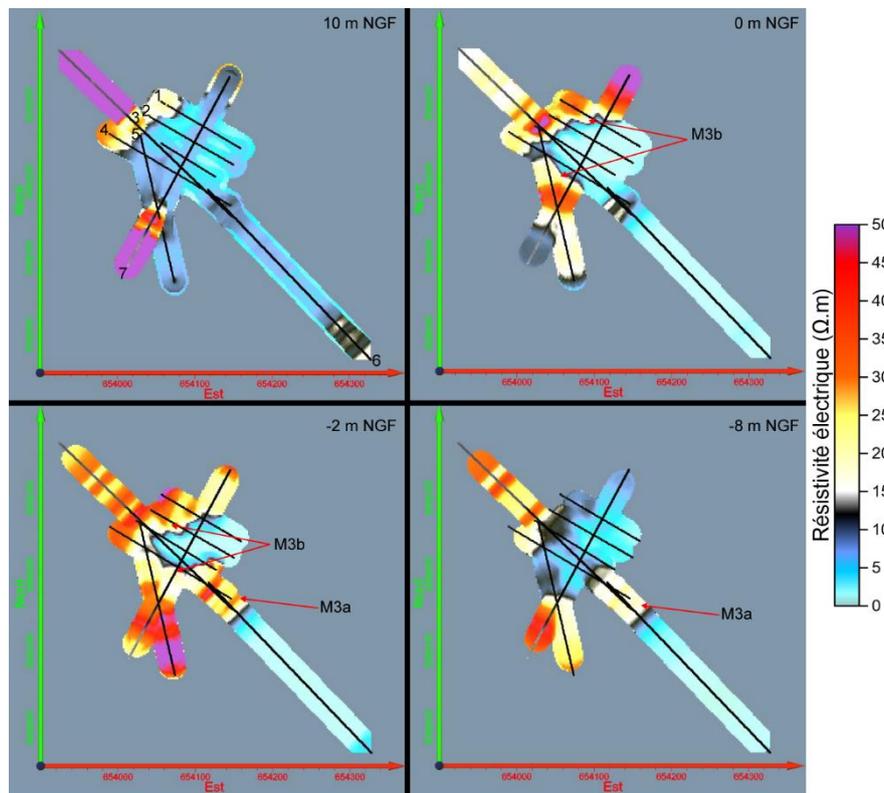


Figure 1.8 : Coupes selon l'axe Z à différentes altitudes du modèle 3D de résistivité généré à partir des sections électriques de la partie aval de la vallée. Les sections correspondent aux tracés noirs.

Un modèle 3D des résistivités de la subsurface a été généré à partir des sections électriques de la partie aval (Figure 1.8). Comme les sections sont espacées d'une vingtaine de mètres entre-elles (sections 1, 2, 3 et 4), il faut considérer le modèle 3D uniquement comme une aide à la représentation de la géométrie de l'anomalie électrique M3b. Sur les coupes à 0 et -2 m NGF, le possible dépôt d'abrasion correspond à une plateforme englobant le milieu plus conducteur M1. La géométrie de l'anomalie M3a semble être dans la continuité de M3b. Comme sa profondeur d'apparition et sa signature électrique sont similaires à celles de M3b, ceci pourrait être des arguments pour attribuer l'anomalie M3a au dépôt d'abrasion et non à un effet de drainage associé au Grand Écours.

1.2.2 La partie centrale de la vallée

Les sections électriques de la partie aval ont mis en évidence i) un remplissage de la vallée par des alluvions fines (Bri) avec une forte salinité, caractérisées par les milieux conducteurs M1, M2 et M3-2, ii) le substrat calcaire et sa couche de marnes (M4, M5, M6, M7) et iii) un présumé dépôt d'abrasion de la paléo-falaise (M3b, voire M3a). Afin de retrouver ces milieux plus en amont, des sections électriques ont été implantées dans la partie centrale de la vallée, près du site néolithique (Figure 1.3).

Les sections 9, 10 et 11 sont positionnées orthogonalement au talweg de la vallée, près de la paléo-falaise du site du Pontet (Figure 1.3). La section 12 et sa continuité, la section 13, sont parallèles à l'axe du talweg et recoupent les sections 9, 10 et 11. La section 14 a été implantée au niveau du versant sud et orthogonalement au talweg.

Les sections 9, 10 et 11 présentent les mêmes milieux et anomalies électriques que celles identifiées dans la partie aval de la vallée (Figure 1.9). Le versant NW est caractérisé par une paléo-falaise composée par les milieux électriques du substrat (M5 à M7). Le niveau de marne (M6) est intercalé entre les deux formations calcaires (M5 et M7). Le comblement de la vallée présente les mêmes signatures électriques que plus en aval, milieux M1, M2 et M3-2, et correspondent à des alluvions fines. Le possible dépôt d'abrasion de la falaise (M3b) est aussi présent.

Sur la carte de CEa (Figure 1.3), la zone plus résistante (50 à 75 mS/m, vert), présente en bas de versant (traversée par les sections 10 et 12), est liée au dépôt d'abrasion. En effet, ce dernier est identifié sur les sections 10 et 12 (Figure 1.9 et 1.10). Sur le profil de CEa de la section 12 (Figure 1.10), la diminution de la CEa est clairement associable à cette anomalie électrique M3b. Ainsi, ce dépôt d'abrasion correspond à une plateforme épousant la géométrie du versant nord de la vallée, d'amont en aval.

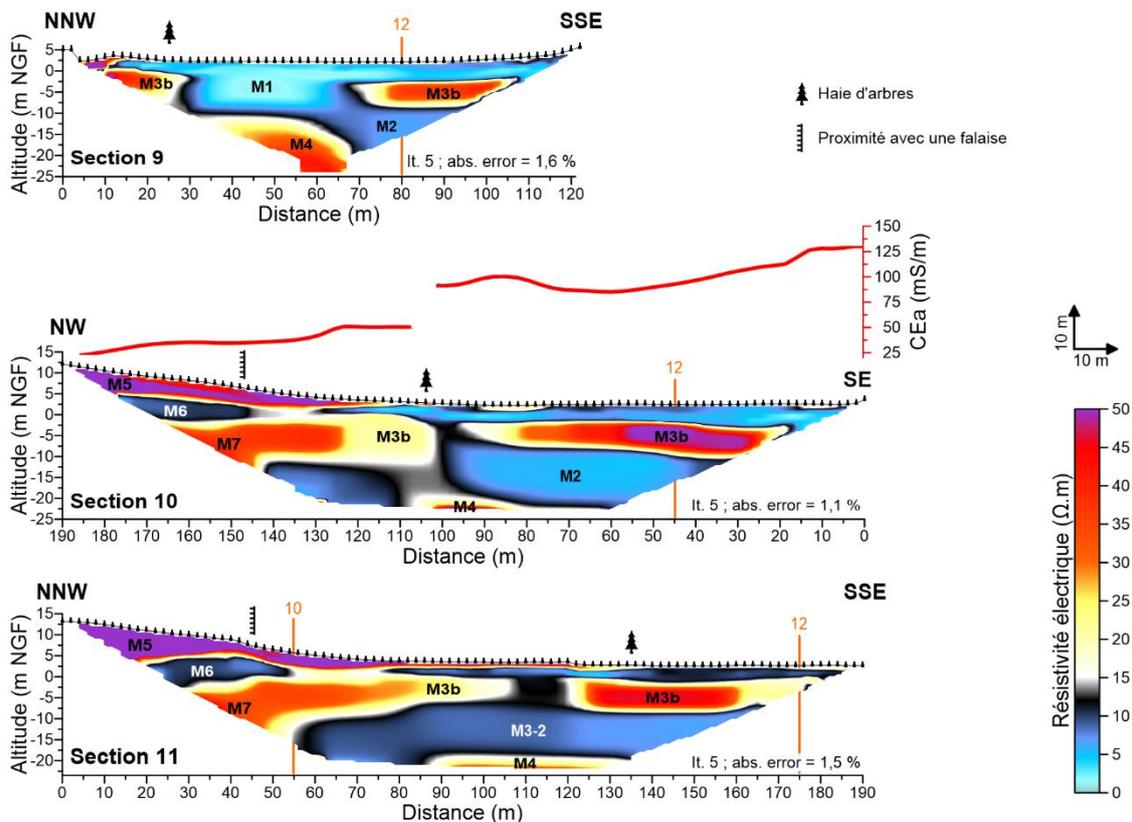


Figure 1.9 : Sections électriques dans la partie centrale de la vallée.

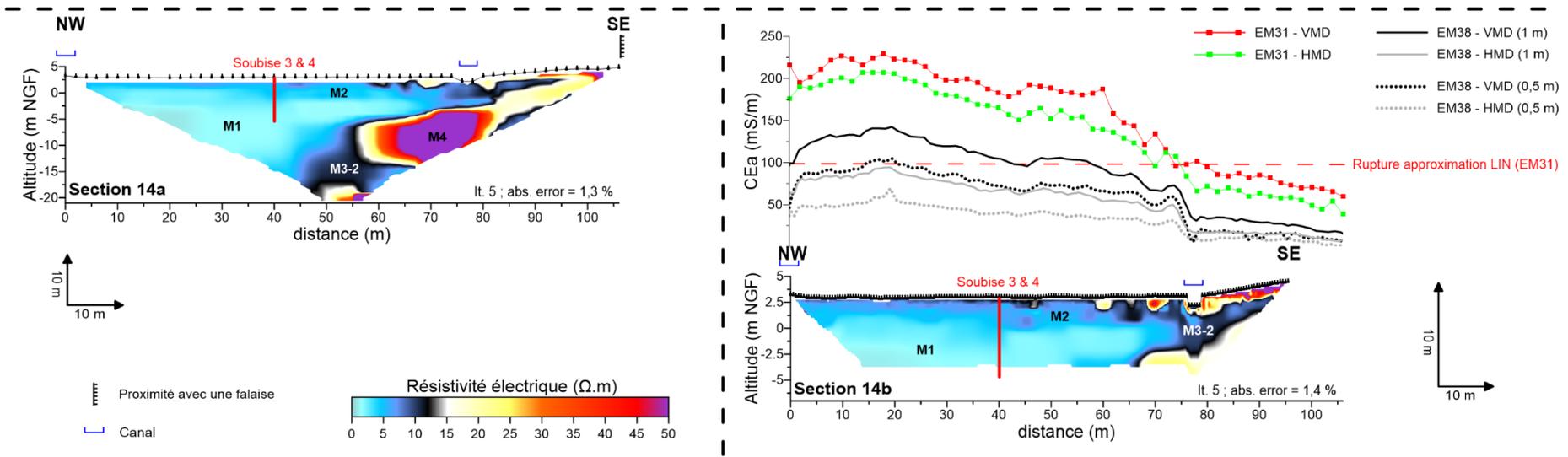
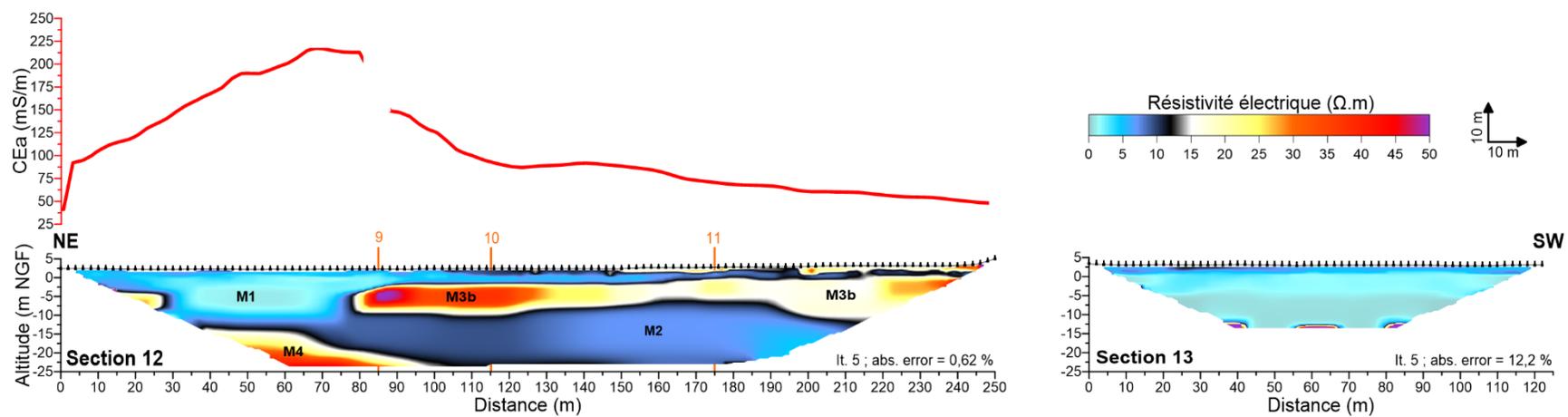


Figure 1.10 : Sections électriques de la partie centrale de la vallée. La section 14a a été réalisée avec un écartement inter-électrodes de 2 m en double configuration Wenner-Schlumberger – dipôle-dipôle. La section 14b a été effectuée en parallèle de la section 14a mais avec écartement de 0,5 m, en configuration dipôle-dipôle. Les carottage Soubise 3 et 4 sont indiqués et mis à l'échelle sur les sections 14a-b.

La section 13 est la continuité SW de la section 12 (Figure 1.10). Contrairement aux autres sections, la section 13 est homogène et caractérisée exclusivement par le milieu M1. L'absence de l'anomalie M3b pourrait être liée par une position trop éloignée de la falaise calcaire (90 m). Toutefois, cette couche est aussi absente sur la section 14a, positionnée près du versant sud.

Le comblement de la vallée sur la section 14a est caractérisé par les milieux plus conducteurs M1 et M2 : il s'agit des alluvions fines (Figure 1.10). Le dernier (M2) est présent essentiellement en surface, avec une épaisseur de 2 à 3 m. La partie SE, proche de la falaise calcaire, montre le substrat (milieu plus résistant M4) à moins de 7,5 m sous la surface (il est à plus de 10 m de profondeur en aval de la vallée). Cette partie SE est mieux détaillée sur la section 14b qui a été réalisée avec un écartement inter-électrodes de 0,5 m. Cette section montre que le substrat (M4) est recouvert par le milieu plus conducteur M3-2. Ce dernier est associé aux alluvions fines du fond de vallée. Elles sont recouvertes par une bande plus résistante ($> 25 \Omega.m$) présente en surface. Cette bande correspond vraisemblablement à des éboulis récents de la falaise (présence de nombreux blocs calcaires sur le terrain).

En parallèle de la section 14b, des profils de CEa ont été réalisés avec les conductivimètres EM31-MK2 et EM38-MK2 selon une orientation verticale (VMD) et horizontale (HMD) du dipôle magnétique (orientation des bobines). Sans surprise, la conductivité est plus faible près de la falaise (entre 105 et 75 m) et augmente vers le NW. L'augmentation de la conductivité avec l'écartement inter-bobines renforce le modèle électrique qui présente une partie superficielle plus résistante sur la section 14b (probablement que le sol n'est pas saturé en eau en surface). Cependant, l'écart moyen de conductivité, mesurée à l'EM31, entre la mesure en HMD et VMD est faible, environ 20 mS/m, soit 2 $\Omega.m$ de différence. Ceci indique que le gradient vertical de conductivité est faible, renforçant l'aspect homogène des milieux électriques M1 et M2. Cependant, ce faible écart en HMD et VMD pourrait aussi résulter de la rupture de l'approximation de la condition du LIN pour l'EM31 (conductivité supérieure à 100 mS/m), voire d'une diminution de la profondeur d'investigation. Dans les environnements sédimentaires salins, la mesure de la résistivité apparente (méthode électrique) est principalement influencée par la salinité de l'eau interstitielle : conduction ionique (Choo et Burns, 2014). Il en est de même pour la mesure de la CEa (méthode électromagnétique) mais une dérive de l'approximation du LIN est présente (Beamish, 2011 ; Delefortrie et *al.*, 2014). Puisque la méthode électrique ne présente pas de dérive, la relation entre les CEa issues de la pseudosection (section 14a) et celles mesurées à l'EM31 (VMD), pour une profondeur effective d'investigation similaire, permet de visualiser la dérive du conductivimètre liée à la rupture de l'approximation du LIN (Figure 1.11). L'écart entre la conductivité issue de la pseudosection et celle de l'EM31 devient significatif au-delà de 150 mS/m. Ceci indique que les zones très conductrices ($> 250 \text{ mS/m}$) sur la carte de CEa sont en réalité supérieures à 700 mS/m.

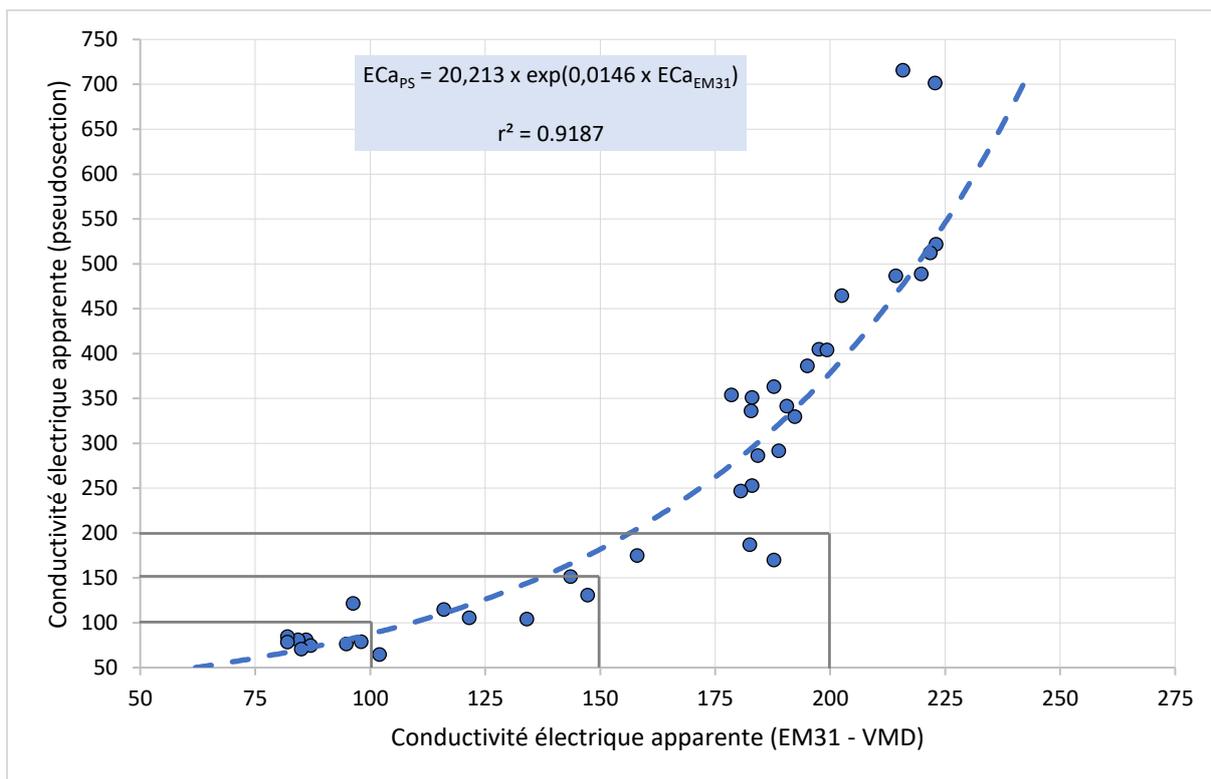


Figure 1.11 : Relation entre la conductivité électrique apparente mesurée par la méthode de la section électrique (ECa_{PS}) et la conductivité électrique apparente mesurée par la méthode électromagnétique (ECa_{EM31}). ECa_{PS} est mesurée en configuration Wenner-Schlumberger et ECa_{EM31} par le conductivimètre EM31. La pseudosection correspond à la section 14a.

De ce fait, les conductivités mesurées à l'EM31 sont très élevées et se rapprochent de celles observées par Delefortrie et *al.* (2014). Ces environnements induisent une diminution de la profondeur d'investigation de 25 % environ. Ainsi, la profondeur d'investigation de l'EM31 est réduite dans la partie basse de la vallée. La proximité des valeurs de conductivité apparente mesurées en mode horizontal (HMD) et vertical (VMD) à l'emplacement de la section 14b pourrait être associée à la réduction de la profondeur d'investigation lorsque les bobines de l'EM31 sont verticales (VMD).

1.3 IMPLANTATION DES CAROTTAGES

Les prospections électromagnétiques et électriques fournissent une approche paléogéographique de la vallée du Grand Écours basée sur des hypothèses issues de l'interprétation des milieux et des anomalies de conductivité/résistivité rencontrés. Les meilleurs sites de carottage sont ceux qui permettront de répondre aux deux objectifs suivants :

- Caractériser la sédimentation du comblement de la vallée et d'acquérir des proxies paléoenvironnementaux ;
- Comprendre l'origine des anomalies géophysiques identifiées et les interpréter en tant que structures sédimentaires.

1.3.1 La partie aval de la vallée

Dans la partie aval de la vallée, la présence systématique de l'anomalie électrique M3b sur toutes les sections de résistivité mérite de comprendre la structure sédimentaire qui en est l'origine (Figure 1.4, 1.5 et 1.6). L'implantation de carottages dans cette partie devrait permettre d'analyser les sédiments des milieux conducteurs M1 et M2 et ceux de l'anomalie M3b. Pour localiser plus précisément les zones d'implantation, des sections électriques à 0,5 m d'écartement inter-électrodes ont été effectuées dans la partie aval. De plus, des essais pénétrométriques couplés à de la diagraphie électrique ont été mis en œuvre en parallèle des carottes. L'objectif était de comparer le pénétrogramme et le profil électrique avec les résultats de la carotte, en vue (dans un premier temps) de vérifier le bon

fonctionnement du dispositif de diagraphie. Puisque le couple pénétrogramme et profil électrique fonctionne de paire dans les parties suivantes, il est raccourci par l'expression « diagraphie ».

Dans la partie aval (Figure 1.12a), deux carottages ont été implantés le long de la section 4 (Figure 1.5). Le premier (Soubise 1 : S1) a été positionné au-dessus l'anomalie M3b. Le second (Soubise 2 : S2) a été implanté au sein de l'anomalie M3-2. Quatre sections électriques à 0,5 m ont été centrées sur les positions des deux carottages (Figure 1.12) : les sections 15a-b sur S1 et les sections 16a-b sur S2.

Cet écartement offre une meilleure résolution verticale que celui à 2 m mais la profondeur d'investigation est moindre. Sur S1, les sections 15a-b sont caractérisées par le milieu M1 (Figure 1.13). La base est associée à l'anomalie M3-2, présente à 5 m sous la surface. La partie superficielle est composée par une couche plus résistante correspondant à un état du sédiment insaturé en eau. Sur S2, les sections 16a-b sont associées au milieu M2, légèrement plus résistant que M1. La base correspond à l'anomalie M3b apparaissant à 4 m de profondeur. Ainsi, les deux anomalies plus résistantes M3-2 (S1) et M3b (S2), identifiées sur ces quatre sections, ne sont pas cohérentes avec la section 4 (Figure 1.4). En effet, cette dernière présente l'anomalie

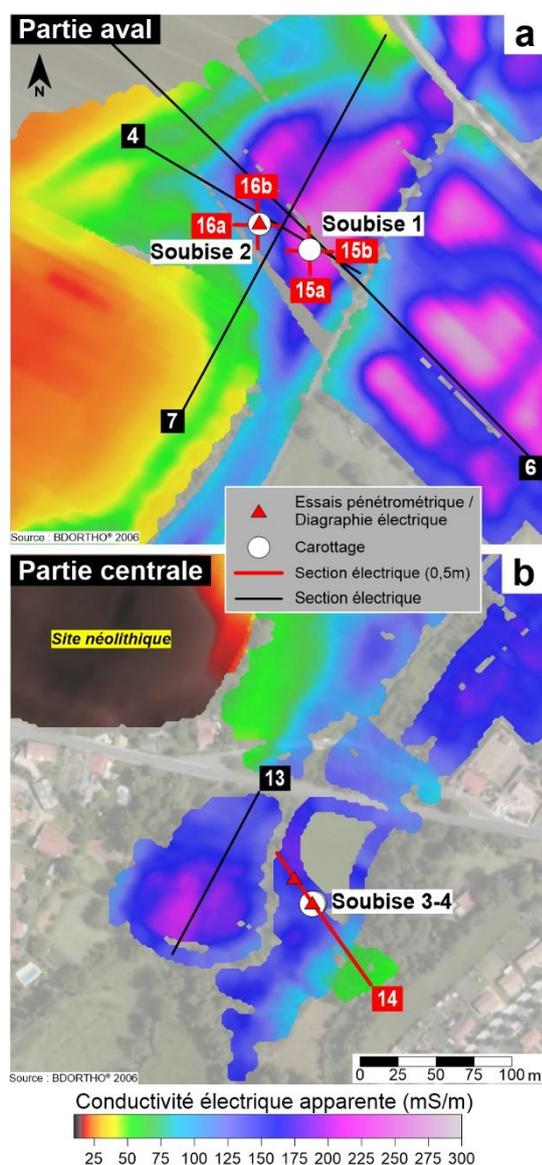


Figure 1.12 : (a) Localisation des sections électriques à 0,5 m, des essais pénétrométrique couplés à la diagraphie électrique et des carottages dans la partie aval de la vallée. (b) Localisation des essais pénétrométriques couplés à la diagraphie électrique et des carottages dans la partie centrale de la vallée.

M3b sur S1 et M3-2 sur S2. Néanmoins, les deux anomalies sont présentes à la base des sections 15a-b et 16a-b, là où la résolution de la section est la plus faible (Figure 1.13).

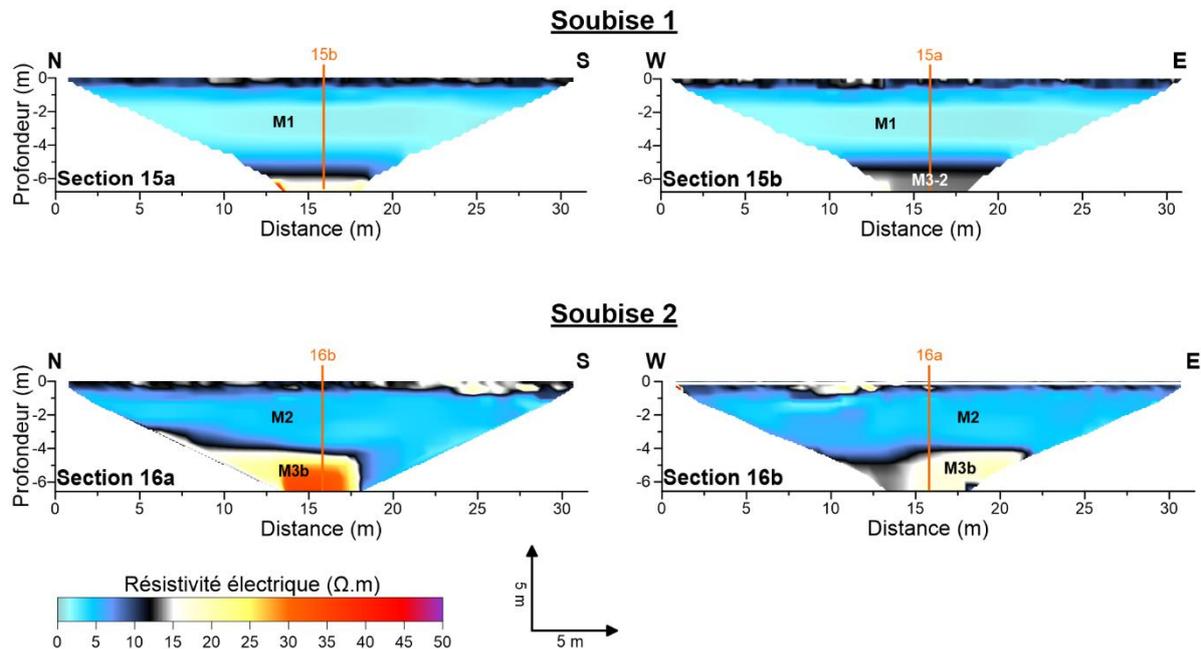


Figure 1.13 : Sections électriques positionnées au niveau des carottages Soubise 1 et Soubise 2.

1.3.1.1 Apport du pénétrogramme et du profil de diagraphie électrique

Afin de tester le dispositif de diagraphie électrique rattachée au pénétromètre de type PANDA© 2, un essai a été effectué, après la campagne carottage, à proximité immédiate de S2 (Figure 1.12). Les profils de diagraphie et le pénétrogramme sont présentés en parallèle du log stratigraphique de S2 (Figure 1.14). Les interprétations paléoenvironnementales des carottes S1 et S2 seront détaillées ultérieurement. Les analyses sédimentaires, granulométriques et magnétiques ont été réalisées par Carole Romey (ATER à l'Université de La Rochelle).

En surface, la résistance de pointe (Qd) et la résistivité sont élevées dans les premiers cinquante centimètres mais elles diminuent rapidement jusqu'à 0,5 m. Cette décroissance est liée à la transition entre la zone vadose et la zone saturée du sol. Le pénétrogramme et le profil de résistivité ont une étroite relation avec les variations de granulométrie et de teneur en eau du sédiment. En effet, la résistance de pointe (Qd) et la résistivité électrique varient de manière inverse avec ces paramètres. Le diagramme granulométrique présente de légères variations de la fraction limoneuse qui sont détectées par la résistivité électrique. Notamment à 1,5 m de profondeur où une faible augmentation de cette fraction se traduit par une augmentation de la résistivité. Cette variation n'est pas détectée sur le pénétrogramme, illustrant un des intérêts de coupler la diagraphie avec la pénétrométrie.

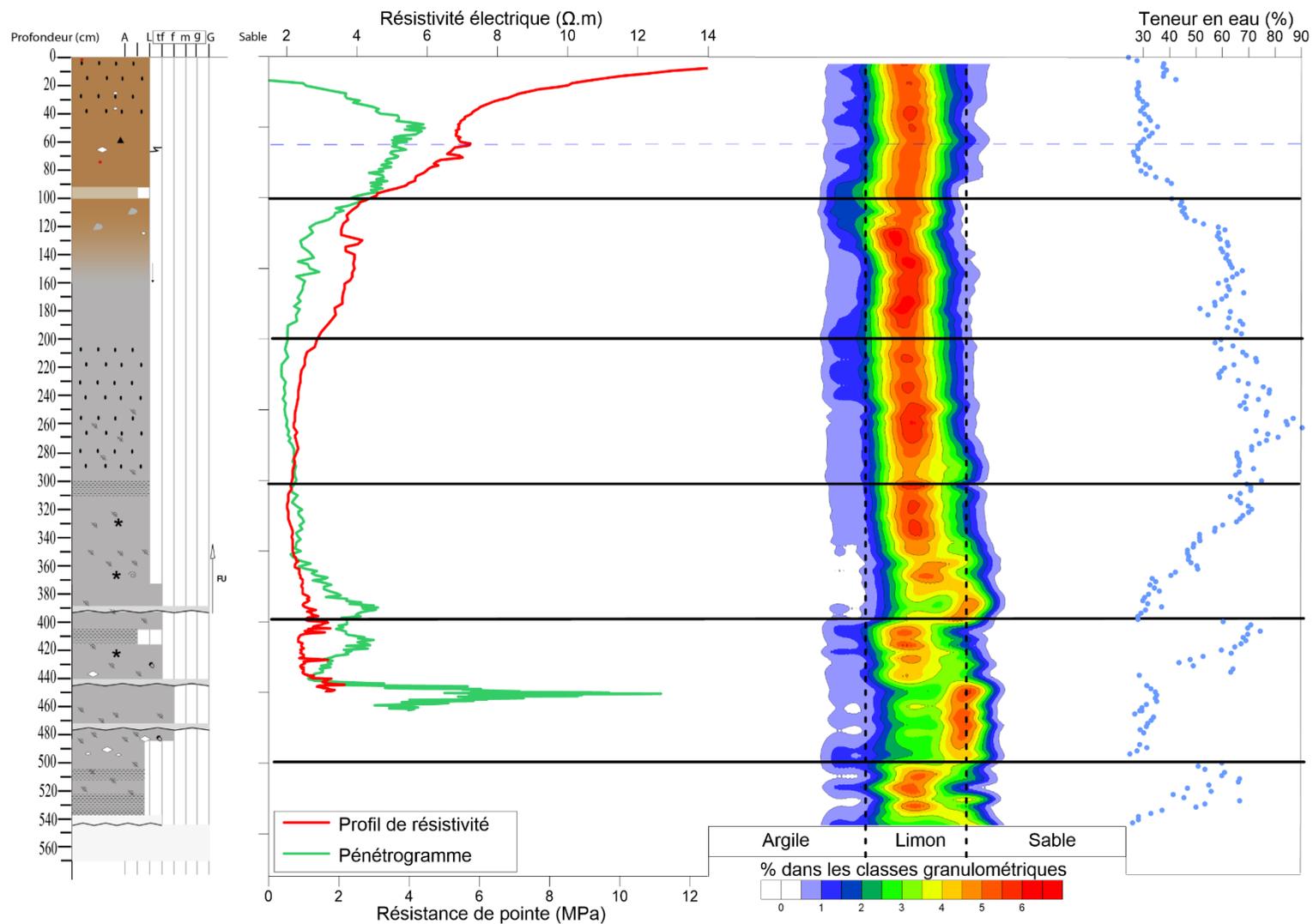


Figure 1.14 : Log stratigraphique schématique de Soubise 2 (S2) associé au profil de résistivité électrique et au pénétrogramme issu du dispositif couplant diagraphie et pénétrométrie. Au centre, évolution de la granulométrie et de la teneur en eau en fonction de la profondeur. ANALYSES SÉDIMENTAIRE ET DESSIN DU LOG PAR CAROLE ROMÉY. DIAGRAMME GRANULOMÉTRIQUE PAR PIERRE STEPHAN.

Entre 3,5 et 4,5 m de profondeur, les petites couches sableuses d'épaisseur centimétrique sont clairement identifiées sur le pénétrogramme et le profil électrique. Des décalages centimétriques (inférieurs à 10 cm) entre la position de la couche sableuse et les pics de Qd et de résistivité sont présents. Ils peuvent être liés à la compaction du sédiment lors du carottage. Pour le profil électrique, ces décalages peuvent résulter du volume d'investigation du dispositif, lissant les faibles variations de résistivité du le sédiment. Néanmoins, le pénétrogramme et le profil électrique sont bien corrélés avec les variations sédimentaires à l'échelle de la lamine.

La diagraphie de résistivité électrique, couplée avec le pénétrogramme, fournit donc des informations ponctuelles sur les variations sédimentaires à l'échelle centimétrique. Cette méthode sera utilisée comme la dernière étape de cette démarche méthodologique pour évaluer l'implantation des carottages.

1.3.1.2 Études paléoenvironnementales et magnétiques des carottes S1 et S2 (par Carole Romey)

« La série sédimentaire fluviomarine holocène étudiée provient de deux carottages d'environ 5 m de profondeur, S1 (Figure 1.16) et S2 (Figure 1.15), réalisés à environ 3 m au-dessus du niveau de la mer. La profondeur du carottage S1 ayant été limitée par la présence d'une couche calcaire, nous avons décidé de positionner le sondage S2 à 30 m de S1 dans une zone moins résistante (Figure 1.3 et 1.4), afin d'essayer de dépasser ce niveau de calcaire. Cependant nous l'avons aussi heurté en réalisant S2, mais environ 1 m plus en profondeur.

Les différences de texture granulométrique entre les deux enregistrements montrent une importante variation latérale de sédimentation sur une très faible distance (30 m) pouvant être rattachée à la proximité des cours d'eau (Grand Écours et Charente) et au démantèlement de la couche d'abrasion de la falaise M3. Les datations radiocarbone réalisées sur deux restes végétaux (inflorescence) vers 3,5 m de profondeur (S2, Figure 1.15) démontrent que l'enregistrement sédimentaire est fortement perturbé et présente d'importantes lacunes de sédimentation et/ou des variations du taux de sédimentation (e.g. l'Âge du Bronze ne représenterait que 0,4 m d'épaisseur, voir serait absent). Cependant les dates obtenues permettent de rattacher l'enregistrement sédimentaire à la période d'occupation supposée du site archéologique du Pontet, à savoir le Néolithique récent/final (ca. 3600 - 2200 Cal. BC). L'excellent état de conservation de ces inflorescences indique qu'il est improbable qu'il y ait eu un remaniement de ces restes végétaux.

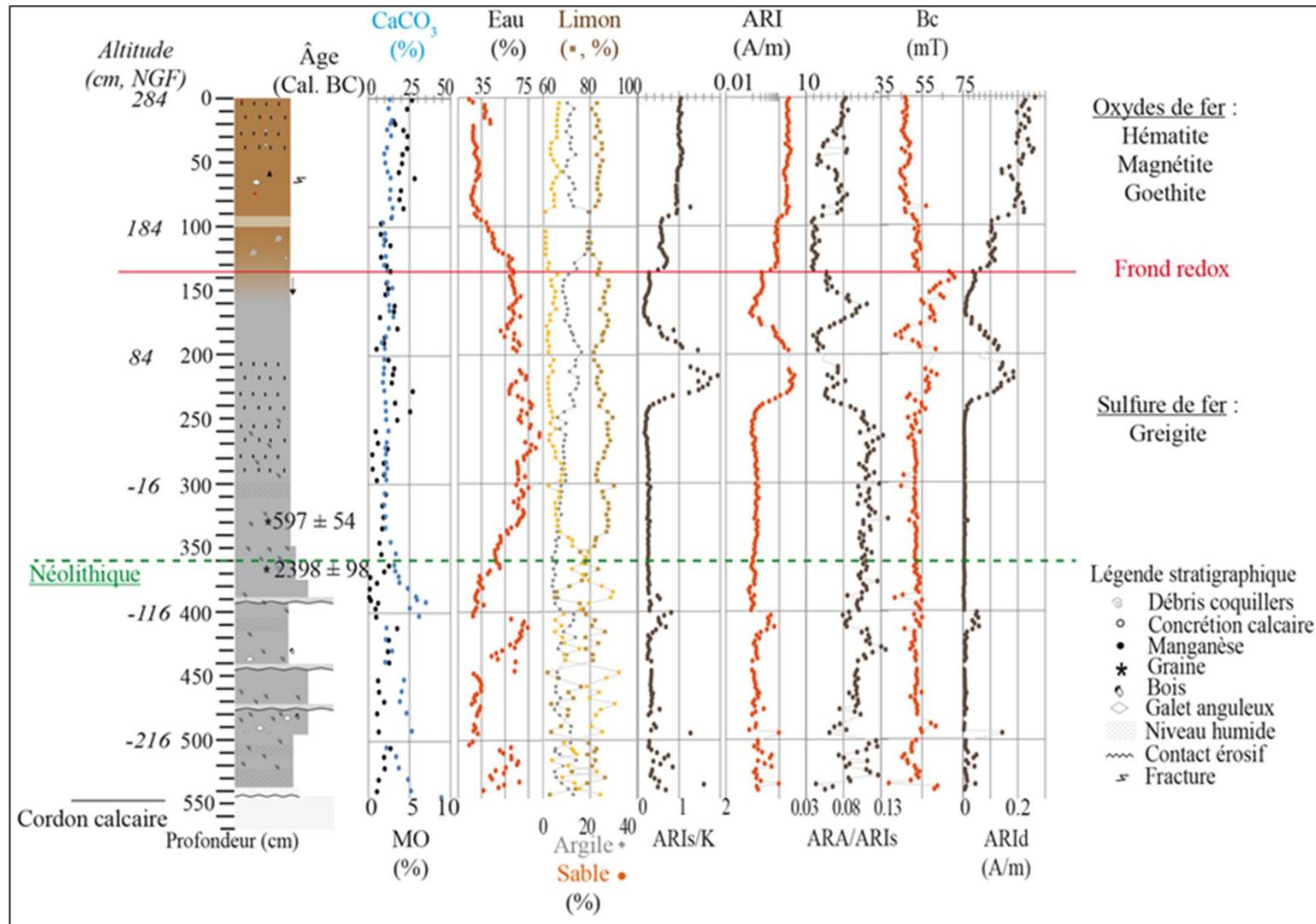


Figure 1.15 : Log stratigraphique schématique de l'enregistrement sédimentaire S2, illustrant les données sédimentologiques (teneurs en matière organique –MO–, carbonate de calcium -CaCO₃- et eau), granulométriques et magnétiques (ARI : aimantation rémanente isotherme, ARIs : aimantation rémanente isotherme à saturation (en anglais SiRM), K : susceptibilité magnétique, Bcr : champ coercitif rémanent, ARId : aimantation rémanente isotherme dure (en anglais HiRM)). ©C. Romey

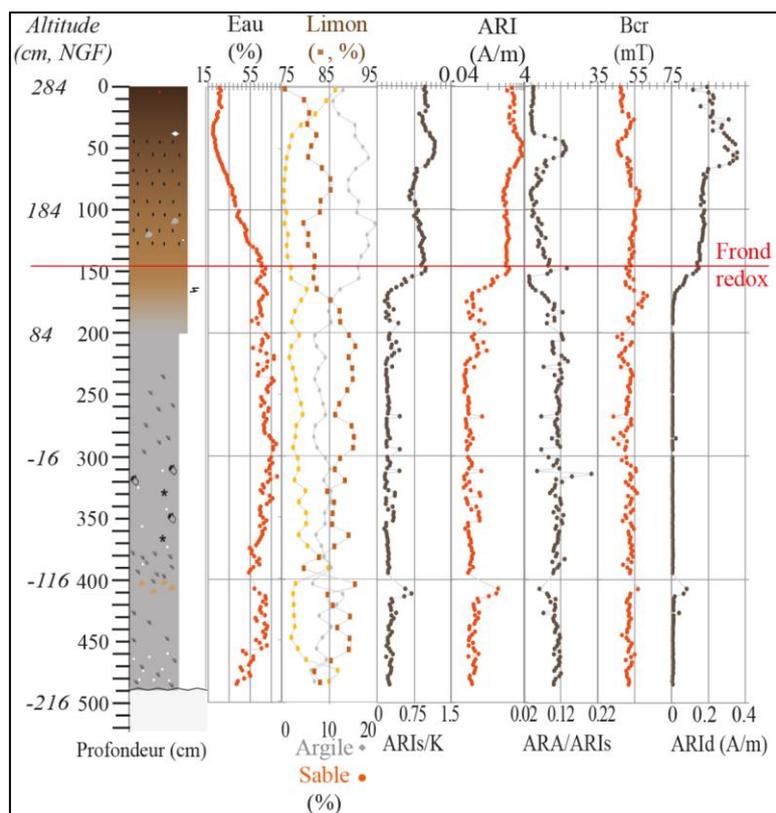


Figure 1.16 : Log stratigraphique schématique de l'enregistrement sédimentaire S1, illustrant les données granulométriques et magnétiques (ARA: aimantation rémanente anhystérique, ARI : aimantation rémanente isotherme, ARIs : aimantation rémanente isotherme à saturation (en anglais SiRM), K : susceptibilité magnétique, Bcr : champ coercitif rémanent, ARId : aimantation rémanente isotherme dure (en anglais HiRM). Se reporter à la Figure 1.15 pour les légendes du log stratigraphique. ©C. Romey.

L'absence de figures sédimentaires observables à l'ouverture des carottes sédimentaires est probablement due au mode de carottage par percussion qui a détruit la cohésion des sédiments riches en eau (entre 24 et 87%, en moyenne 52%, Figure 1.15 et 1.16). Les sédiments ont une texture limono-argileuse avec 75-90% de limon et 6-20 % d'argile. Cependant une importante fraction sableuse est présente dans la partie basse de l'enregistrement S2 (jusqu'à 30% de sable fin mais moins de 3% de sable moyen et grossier), au niveau de trois passées ayant une granulométrie plus grossière (gravier) et présentant un granoclassement. Ces passées sont principalement composées d'éléments de taille supérieure à 2 mm tels que des débris de coquilles et des graviers anguleux de calcaire. Elles témoignent d'évènements de fort hydrodynamisme (crues). Malgré la présence récurrente de coquilles marines, la faible teneur en organismes marins tels que les foraminifères et les ostracodes (moins de 5 individus par gramme de sédiment humide) indique que la sédimentation est largement dominée par l'influence fluviale, avec des incursions marines ou des remaniements de sédiments.

Les données magnétiques des deux carottages mettent en évidence différents comportements magnétiques (Figure 1.15 et 1.16). On observe une répartition classique de la minéralogie magnétique en fonction de l'état redox du milieu. Dans la partie supérieure de l'enregistrement la minéralogie magnétique est dominée par des oxydes de fer, ce qui est concordant avec l'état oxydé des sédiments (couleur brun-ocre) qui témoigne des conditions vadoses actuelles du site ainsi que des processus de

pédogénèse. A contrario, dans la partie inférieure où les sédiments gris sont caractéristiques d'un état réduit, la minéralogie magnétique est dominée par les sulfures de fer (e.g. greigite). On retrouve ces variations d'état d'oxydation dans l'évolution de la susceptibilité magnétique qui est d'un ordre de grandeur plus élevé dans la partie supérieure de l'enregistrement. Cette variation traduit un enrichissement magnétique dans la partie supérieure des carottes où les porteurs du signal magnétique sont principalement des oxydes de fer. La magnétite est principalement produite dans les horizons superficiels des sols tandis que l'hématite et la goethite sont associées aux horizons plus profonds marqués par les phénomènes de battement de nappe (hydromorphie). Les variations d'ARA/ARIs (ARA : Aimantation Rémanente Anhystérétique ; ARIs : Aimantation Rémanente Isotherme à saturation ; Annexe 1 ; Figure 1.16) mettent en évidence deux phases successives de pédogénèse entre 0 et 1,3 m de profondeur.

En outre, les différents paramètres magnétiques de S2 montrent d'importantes variations entre 1,8 et 2,4 m de profondeur, analogue aux paramètres de la partie sol actuel, caractéristiques de la présence d'un paléosol. Ces variations pourraient être le marqueur d'anthropisation du milieu, liées aux feux et probablement rattachées à la période romaine. La présence de ce pic sur S1 est beaucoup moins marquée (entre 1,9 et 2,2 m de profondeur), voir absente, ce qui confirme l'importante hétérogénéité spatiale de la sédimentation et/ou la présence d'activités anthropiques probablement très localisées.

L'homogénéité des paramètres magnétiques entre 2,4 et 4 m de profondeur témoigne d'un environnement de dépôt antérieur plus stable, qui selon les datations pourrait correspondre à l'Âge du Fer et une partie de l'Âge du Bronze. La variation des paramètres magnétiques vers 4 m de profondeur est particulièrement abrupte, à la limite de la carotte, et pourrait témoigner de pollution du matériel échantillonné lors des carottages par du matériel provenant de niveaux supérieurs. Cependant, la bonne corrélation de cet événement entre S1 et S2 semble démentir l'hypothèse d'une pollution. En l'absence de carottes jumelles, il est impossible de lever cette incertitude. » (Mathé et Ard, 2015)

1.3.2 La partie centrale de la vallée

Dans la partie centrale de la vallée, la zone d'implantation des carottages s'est focalisée au niveau de la section 14 (Figure 1.12b). La section 14a, avec un écartement inter-électrodes à 2 m, et la section 14b (à 0,5 m) ont été présentées précédemment (Figure 1.10). Dans cette partie de la vallée, le comblement est homogène et caractérisé par les milieux électriques plus conducteurs M1 et M2. Pour détecter de possible hétérogénéité dans le sédiment, deux diagraphies électriques ont été effectuées le long de la section 14. La première a été implantée sur la position 20 m (diagraphie 1) et la seconde sur la position 40 m (diagraphie 2 ; Figure 1.10 et 1.12). Le choix de la position des carottages a été décidé en fonction des résultats des deux diagraphies.

1.3.2.1 Apports des diagraphies et des pénétrogrammes

Les résultats des diagraphies 1 et 2 sont présentés sur la Figure 1.17. La diagraphie 1 est celle effectuée au niveau de la position 20 m des sections 14a et 14b (Figure 1.10 et 1.12) et la diagraphie 2 à la position 40 m.

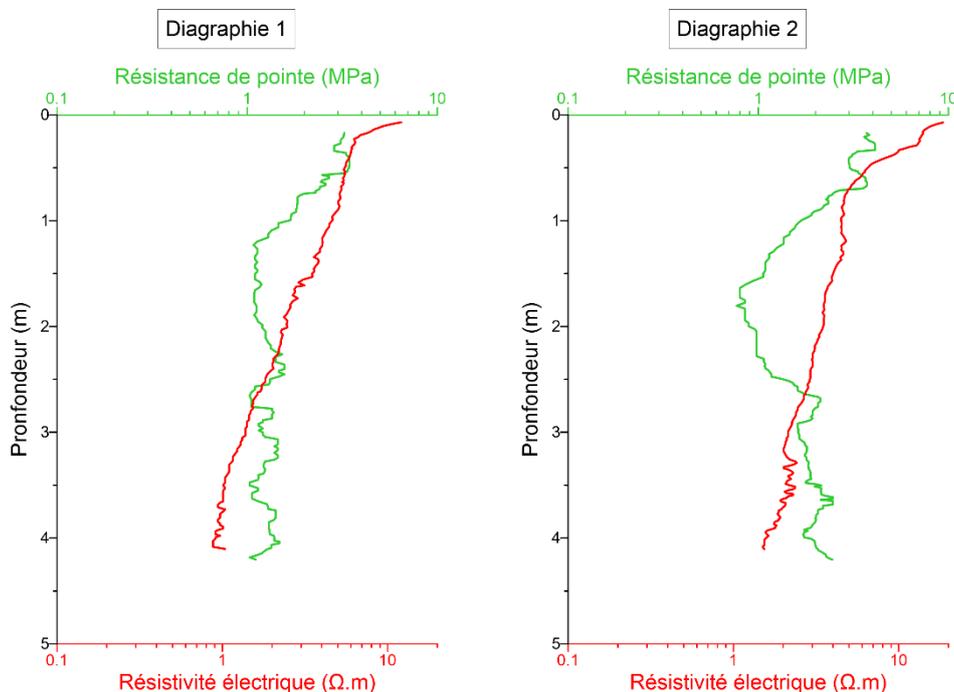


Figure 1.17 : Diagraphies 1 et 2 réalisées sur le long de la section électrique 14. Pénétrogrammes lissés sur une fenêtre de 11 valeurs (basse fréquence du signal).

Les pénétrogrammes et les profils de résistivité des deux diagraphies (Figure 1.17) sont relativement proches et présentent les mêmes tendances générales. La résistivité sur la diagraphie 1 (moyenne : 3 Ω .m) est légèrement supérieure à celle de la diagraphie 2 (moyenne : 4 Ω .m). Cette légère différence pourrait être liée au milieu M2, plus présent au niveau de la diagraphie 2 sur la section 14b (Figure 1.10). Les profils de résistivité des deux diagraphies présentent très peu de variations, hormis en surface (Figure 1.17). Par rapport à la diagraphie réalisée en aval, la partie superficielle des diagraphies 1 et 2 ne possèdent pas de fortes résistivités. Ceci est probablement lié à la texture du sol qui correspond à une prairie permanente dans cette zone (meilleure rétention de l'eau en surface). Contrairement à la partie aval qui est une culture.

Les pénétrogrammes ne présentent pas de variations très significatives avec une dynamique comprise entre 1 et 4 MPa. De ce fait, les pénétrogrammes et les profils électriques témoignent d'un milieu sans grande variation sédimentaire dans les quatre premiers sous la surface. Néanmoins, un petit bombement de la résistivité, associée à un petit pic de résistance de pointe, est localisé à la base de la diagraphie 2 (entre 3,25 et 4 m de profondeur). Il pourrait être lié à des passés sédimentaires légèrement plus grossières.

Au regard des informations fournies par les diagraphies ainsi que par les sections 14a et 14b dans cette zone, la position du carottage a été décidée sur la position 40 m de la section 14, c'est-à-dire à l'emplacement de la diagraphie 2 (Figure 1.10 et 1.12). La forme en cuvette du milieu M2, visible sur la section 14b (Figure 1.10), et le petit bombement de la résistivité sur la diagraphie sont les principaux arguments qui ont permis de sélectionner l'emplacement du carottage.

1.3.2.2 Analyses des carottes S3 et S4 (d'après les travaux de Carole Romey)

Au niveau de la zone sélectionnée par les prospections géophysiques, deux carottages ont été effectués en jumeau à 1 m de distance l'un de l'autre (Soubise 3 et Soubise 4 ; Figure 1.12). Le sondage S4 (Soubise 4) a été réalisé avec un décalage de 50 cm en profondeur afin de pouvoir corrélérer les deux carottes l'une avec l'autre et ainsi corriger les effets du carottage au niveau des extrémités (pollutions, perte de matériel...).

Les carottes S3 (Soubise 3) et S4 sont présentées sur la Figure 1.18. Cette figure présente les logs des deux carottes ainsi que leurs analyses granulométriques et la teneur en eau de S3. Les résultats de la diagraphie électrique et de la pénétrométrie effectuée en parallèle de S3 sont couplés avec les données des carottages et seront discutés ultérieurement.

Les carottes S3 et S4 présentent une série fluviomarine holocène de 8 m (S3) et de 7,5 m (S4) réalisées à environ 3 m NGF au-dessus de la mer. L'absence de figures sédimentaires observables est probablement induite par le mode de carottage par vibrations qui a détruit la cohésion des sédiments riches en eau (la teneur moyenne en eau est de 70 %). Les sédiments ont une texture limono-argileuse avec une fraction limoneuse de 75 à 80 % et une fraction argileuse de 10 à 15 %. La fraction sableuse est présente en surface entre 0 et 2 m de profondeur (environ 10 %) et aussi entre 4,5 et 8 m (environ 20 %). La série sédimentaire de S3 et S4 présente une augmentation de la fraction sableuse à partir de 4,5 m de profondeur.

Dans l'ensemble, les carottes jumelles ne présentent pas de variation latérale de faciès. Cependant, une passée d'éléments grossiers, composés de coquilles entières et brisées, est localisée à 4,6 m sur S3. Elle est aussi présente sur S4 mais caractérisées par deux niveaux distincts et plus épais. Des petites passées sableuses associées à des débris coquilliers sont présentes vers 7 m de profondeur, dont la carotte S3 en compte trois et une seule pour S4. Ces différentes passées plus grossières indiquent des petites variations de faciès très locales entre les deux carottes jumelles distantes de 1 m. Les différentes passées sableuses de S3 et S4 sont associées à un granoclassement croissant (augmentation de la fraction sableuse). Comme pour le sondage S2 dans la partie aval de la vallée, ces passées plus grossières témoignaient d'évènements de fort hydrodynamisme, tels des crues (Mathé et Ard, 2015, 2016).

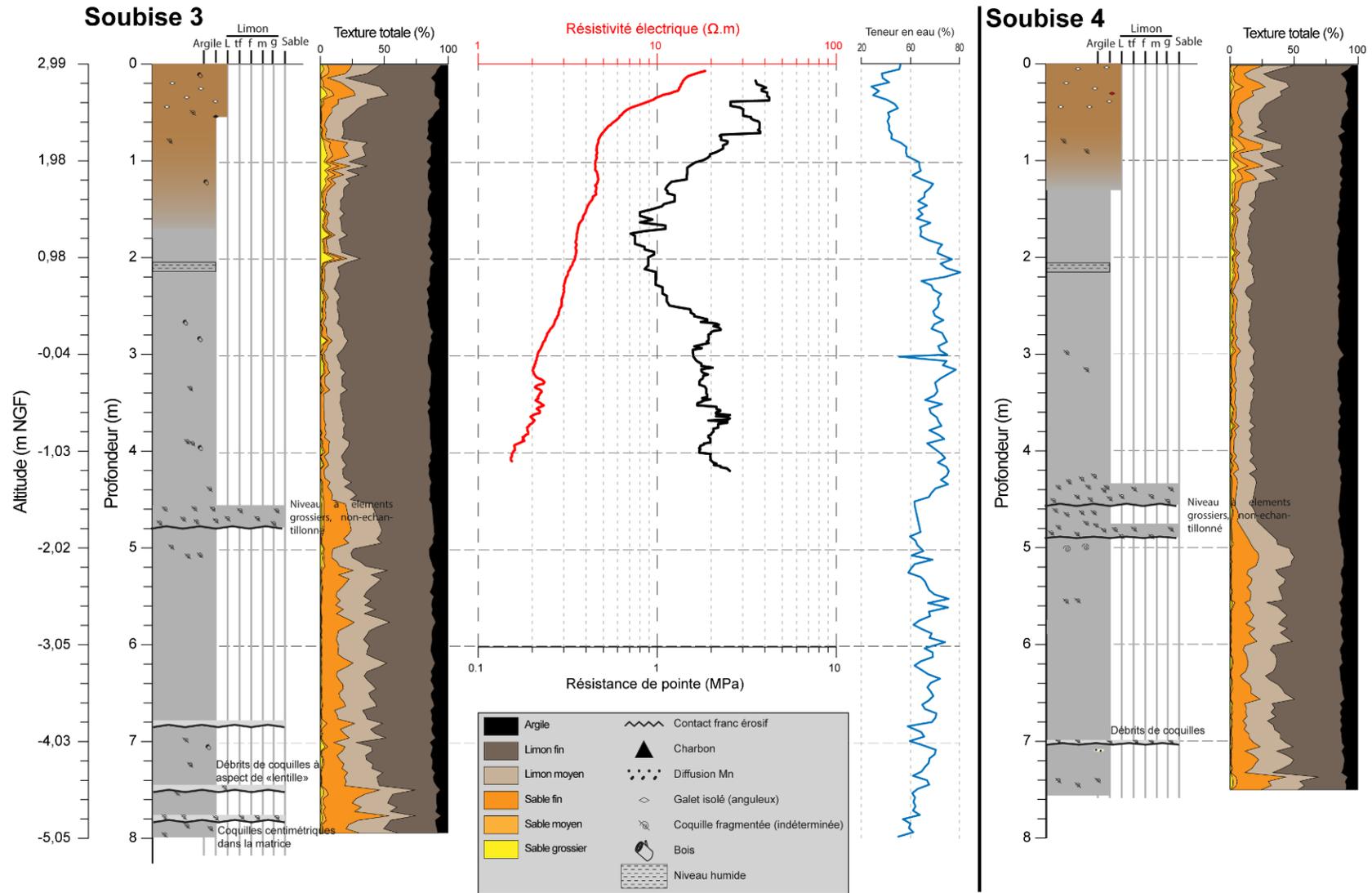


Figure 1.18 : Présentation des logs stratigraphiques schématiques des deux carottes jumelles Soubise 3 (S3) et Soubise 4 (S4) associés à la granulométrie et la teneur en eau de S3 (d'après C. Romey). Le profil électrique et le pénétrographe de la diagraphie 2 est en parallèle de S3.

1.3.2.3 Comparaison entre les carottes et le couplage diagraphie électrique et pénétrométrie

Le profil électrique et le pénétrogramme de la diagraphie 2 sont présentés en parallèle de S3 sur la Figure 1.18. Il est possible que le gradient décroissant de résistivité (visible sur l'ensemble des diagraphies) puisse être induit par la salinité de l'eau interstitielle, qui augmenterait progressivement avec la profondeur (Verhegge et *al.*, 2016).

La partie superficielle de la colonne sédimentaire (0 à 2 m) est associée à une fraction sableuse plus importante (25 %). Ces variations granulométriques sont cohérentes avec le profil électrique qui présente des augmentations de résistivité. Elle se visualise par de légers bombements de la courbe de la résistivité. Les petites variations sur le pénétrogramme sont vraisemblablement induites par cette fraction sableuse qui présente une proportion de sable grossier légèrement plus importante. Les faibles variations de la résistivité sur le profil électrique sont liées à la granulométrie limono-argileuse globalement homogène entre 2 et 4,5 m de profondeur.

Le léger bombement associé à des micro-variations de la résistivité électrique à la base du profil électrique (entre 3,25 et 4 m de profondeur) ne présente pas de relation directe avec la granulométrie. La présence de la fraction sableuse ne semble pas suffisante pour se corréliser avec ces micro-variations. Le pénétrogramme présente aussi des variations dans cette zone mais il ne se corrèle pas non plus directement avec la texture sédimentaire. Ces variations sur le profil électrique et le pénétrogramme sont difficilement interprétables.

1.4 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

La carte de CEa apporte des informations sur des anomalies de conductivité dont l'origine peut être associée à des contrastes sédimentaires. Sur cette base, des sections électriques à différentes résolutions verticales ont été acquises pour préciser les anomalies précédemment identifiées et fournir ainsi une approche stratigraphique de la subsurface. Le recoupement des informations cartographiques et stratigraphiques portées par les prospections électromagnétiques et électriques a fourni ainsi une approche de la paléogéographie de la vallée du Grand Écours. En complément, des diagraphies électriques sont effectuées pour préciser les contrastes électriques et mécaniques du sédiment à une échelle centimétrique, en une position où potentiellement un carottage pourrait être effectué. Cette démarche a ainsi permis de localiser une zone d'intérêt pour l'implantation des carottages.

Les résultats des carottes de la partie aval (S1 et S2) montrent une sédimentation dominée par des alluvions fluviales avec une influence marine peu marquée. La base des carottes correspond à une couche calcaire associée à un dépôt d'abrasion de la paléo falaise. Les premiers sédiments au-dessus de ce niveau correspondent à la période du Néolithique, d'après les datations radiocarbone. Cette étude

paléoenvironnementale des carottes montre que les premiers sédiments exondés sont à 0,4 m NGF et ils correspondent à une période plus récente que le Néolithique.

1.4.1 Approche paléogéographique du site du Pontet

Les sections électriques dans la partie aval et centrale de la vallée ont mis en évidence la présence d'une anomalie M3b bordée par la paléo-falaise. Cette anomalie s'est avérée être un dépôt calcaire d'abrasion de la falaise. Les sédiments, reposant juste au-dessus de ce dépôt, s'apparentent à la période du Néolithique. Ce dépôt calcaire est donc important pour la compréhension de la paléogéographie de la vallée du Grand Écours durant le Néolithique. Des hypothèses de l'extension horizontale du dépôt d'abrasion ont été effectuées par la compilation de la carte de CEa, des sections électriques et des deux carottes Soubise 1 et 2. Cette extension est présentée sur la Figure 1.19.

Le dépôt d'abrasion est présent uniquement sur le versant nord de la vallée, dans la partie aval et centrale. En effet, il n'a pas été observé sur l'autre versant (section 14), ni au-delà du site néolithique (section 13). Ce dépôt pourrait être une spécificité du versant nord et semble correspondre à une plateforme. Cela pose la question du choix de l'implantation de l'occupation néolithique : aurait-elle pu être influencée par la présence de cette plateforme ? Pour répondre à cette question, il est nécessaire de poursuivre les investigations paléoenvironnementales par les carottages sur d'autre zone où ce dépôt est présent. Ceci permettra aussi de vérifier si les sédiments au-dessus du dépôt d'abrasion sont toujours de la période du Néolithique.



Figure 1.19 : Hypothèse de l'extension du dépôt d'abrasion de la falaise réalisée à partir de la synthèse de la carte de conductivité apparentent, des sections électriques et des carottages de Soubise 1 et 2.

1.4.2 Confrontation entre les sections électriques et les carottages

Les sections électriques se sont avérées, aux premiers abords justes, car elles présentaient un comblement sédimentaire de la vallée caractérisée par des milieux électriques très conducteurs (M1 et M2). La nature limono-argileuse avec une teneur en eau et une salinité élevée est cohérente avec les faibles résistivités observées sur les sections. L'anomalie plus résistante M3b correspond bien à un dépôt calcaire d'abrasion de la paléo-falaise. Néanmoins, il est nécessaire de vérifier si les profondeurs d'apparition de l'anomalie M3b et les épaisseurs sédimentaires sont en adéquation avec les carottes et si les résistivités modélisées par les sections électriques sont cohérentes avec les diagraphies. Ces vérifications sont effectuées pour chaque configuration de quadripôle utilisé.

La Figure 1.20 présente des profils électriques extraits des sections 4, 6 et 14a-b pour chaque carottage. Pour une même position, les trois configurations de quadripôle sont représentées indépendamment : Wenner-Schlumberger, dipôle-dipôle et la double configuration. Les écarts de résistivité entre les trois configurations en une même position sont faibles. En effet, les écarts de résistivités sont inférieurs à $1 \Omega.m$ pour les profils extraits des sections 14a-b (Soubise 3) et la section 4 (Soubise 2). Ces écarts sont plus importants (environ $5 \Omega.m$) pour les profils issus de la section 4 (Soubise 1) et ils sont plus importants pour ceux de la section 6 (Soubise 1). Néanmoins, la forme des profils entre les différentes configurations sont similaires entre eux, signifiant que les modèles de résistivité (sections électriques) diffèrent peu d'une configuration à une autre.

Le dépôt d'abrasion calcaire de la paléo-falaise correspond à une anomalie résistante supérieure à $10 \Omega.m$ sur les profils électriques extraits des sections. La transition entre le milieu M1 et M2 (inférieur $7 \Omega.m$) et l'anomalie M3b est progressive jusqu'à atteindre un maximum local sur les profils de Soubise 1 et 2 (Figure 1.20). Ce maximum correspond à la profondeur d'apparition modélisée par les sections électriques. Néanmoins, ces profils montrent que les sections surestiment la profondeur d'apparition du toit de ce dépôt. En effet, un décalage d'environ 1 m existe entre les carottes Soubise 1 et 2 et les profils de résistivité. Compte-tenu de la résolution spatiale d'une section électrique effectuée avec un écartement inter-électrodes de 2 m, une estimation de la profondeur d'une entité avec une précision de 1 m est excellente.

Par rapport aux diagraphies électriques effectuées sur Soubise 2 et 3, les profils électriques extraits des sections suivent la tendance générale des diagraphies. Ceci indique que, localement, les sections modélisent correctement les variations globales de résistivité du milieu. Pour Soubise 3, l'écart entre la résistivité mesurée par diagraphie et modélisée par la section 14a est inférieur de 1 à $2 \Omega.m$. Il en est de même pour la section 4 sur Soubise 2. Pour la section 14b, effectuée avec un écartement de 0,5 m, les variations superficielles de résistivité (premier mètre sous la surface) sont mieux modélisées que celles à 2 m d'écartement. Le profil de la section 14b et ceux de la section 14a sont ensuite similaires plus en profondeur.

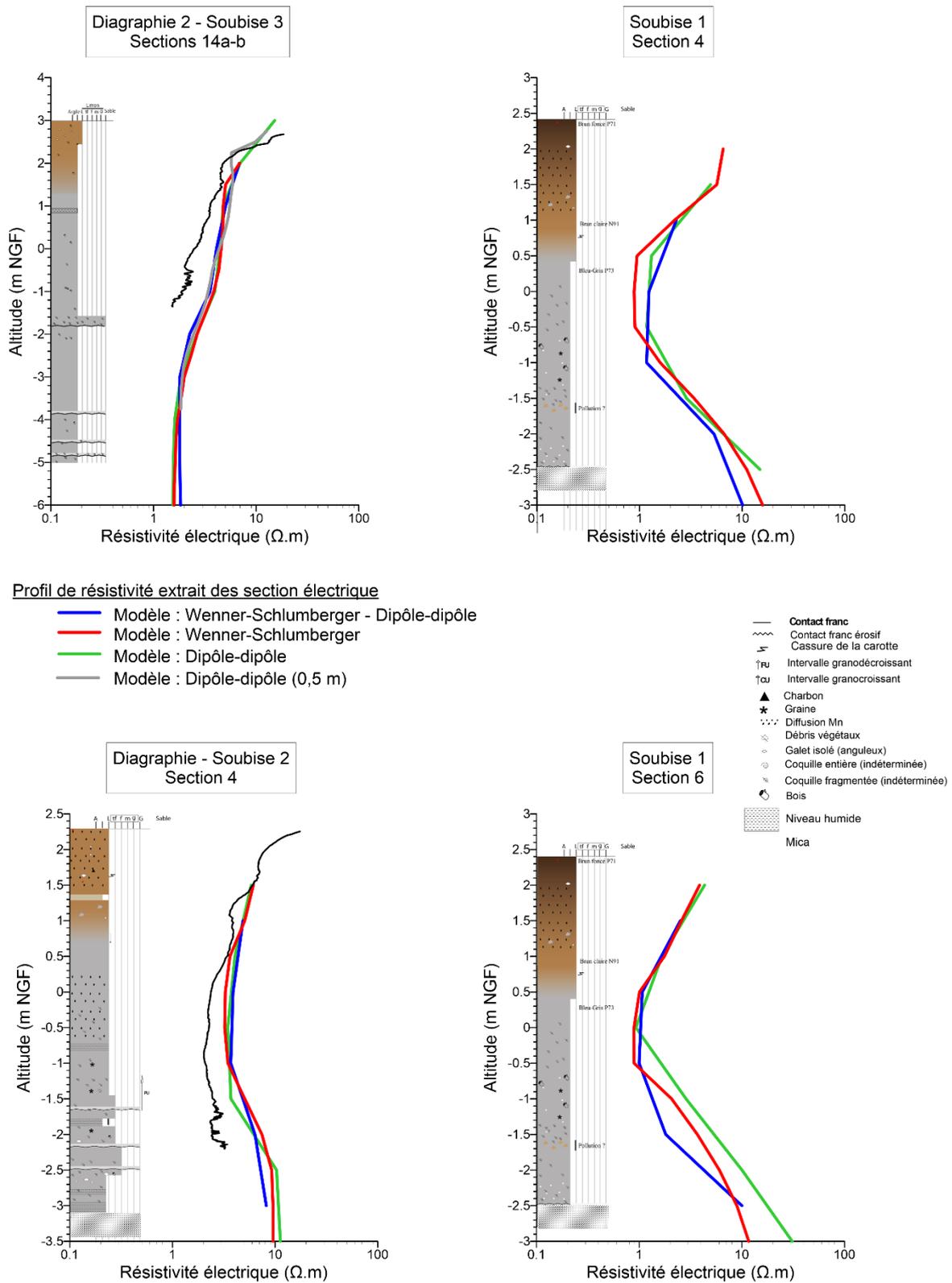


Figure 1.20 : Profils de résistivité extraits des sections électriques 14a-b, 4 et 6. Ils sont associés aux profils électriques des diagraphies effectuées en parallèles de Soubise 2 et 3. Ces profils sont juxtaposés au log stratigraphique de Soubise 1, 2 et 3 (dessin : ©C. Romey).

1.4.3 Comparaison des configurations des quadripôles

La comparaison entre les profils de résistivité extraits des sections, les carottes sédimentaires et les profils électriques des diagraphies montre que la qualité de restitution (locale) des modèles de résistivité. Ces comparaisons montrent aussi de faibles différences entre les différentes configurations de quadripôles pour une même section. Pour confirmer cette observation, une comparaison entre les modèles générés par le dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger est effectuée sur les sections 4 et 6.

Les sections 4 et 6 sont présentées sur la Figure 1.21 avec, pour chaque section, un modèle généré avec la double configuration et deux modèles générés avec la configuration Wenner-Schlumberger et dipôle-dipôle. Les dissemblances entre les deux modèles générés en mono-quadripôle résultent principalement des différences de sensibilité aux variations verticales et horizontales des résistivités des dispositifs Wenner-Schlumberger et dipôle-dipôle. Par exemple, sur la section 6, la couche de marnes (M6) est mieux délimitée sur le modèle Wenner-Schlumberger que sur celui obtenu avec le dipôle-dipôle. En revanche, le modèle issu du dipôle-dipôle semble mieux restituer l'extension latérale du dépôt d'abrasion (M3b) par rapport au modèle Wenner-Schlumberger. Sur la section 4, les principales différences entre les deux modèles proviennent de la modélisation de la zone entre les deux anomalies M3b de part et d'autre de la section. En effet, le modèle Wenner-Schlumberger restitue un environnement homogène (M3-2) alors que le modèle dipôle-dipôle présente un milieu M2 encaissant une couche horizontale plus résistante M3-2. Ces différences entre ces deux configurations pour les sections 4 et 6 sont atténuées, voir « fusionnées », dans le modèle généré par la double configuration. L'utilisation de la double configuration fournit ainsi une meilleure restitution « théorique » des résistivités de la subsurface.

L'interprétation des différents milieux et anomalies électriques identifiés selon les trois modèles de résistivité de subsurface n'est pas pour autant modifiée. En effet, pour les trois configurations de quadripôle, les gammes de résistivité sont identiques et la morphologie du comblement de la vallée, de la paléo-falaise et du substrat, sont similaires. Des différences existent, comme l'extension latérale de l'anomalie M3b ou le substrat (M4) à la base des sections, mais elles ne modifient en rien l'interprétation paléogéographique des sections électriques.

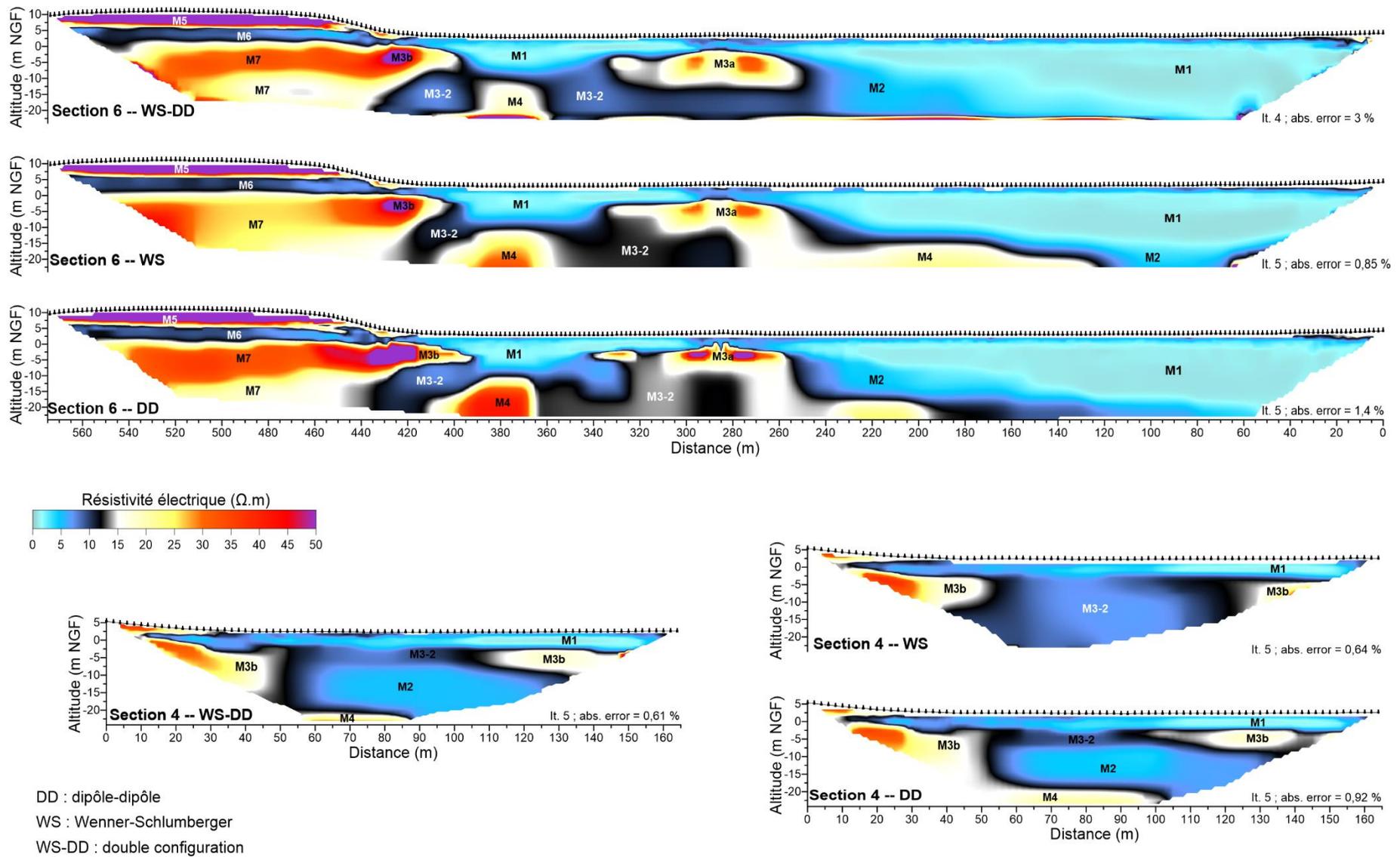


Figure 1.21 : Comparaison entre les sections électriques modélisées en double configuration avec les sections modélisées mono-quadripôle. Exemple des sections 4 et 6.

Ainsi, l'acquisition d'un modèle en double-configuration offre une meilleure qualité de restitution des résistivités de la subsurface qui est une « synthèse » des modèles Wenner-Schlumberger et dipôle-dipôle. Cependant, l'acquisition sur le terrain d'une pseudosection avec deux dispositifs de quadripôle est longue (environ 1h30 avec 64 électrodes) alors qu'elle n'est que de 45 min pour le dipôle-dipôle. Dans des conditions où le temps d'acquisition sur le terrain est limité, il est préférable de d'effectuer les pseudosections avec une seule configuration d'électrodes. La double configuration est réalisée sur des zones particulières où l'interprétation des sections est plus difficile.

1.5 CONCLUSIONS

L'approche paléogéographique de la vallée du Grand Écours montre l'intérêt de la prospection géophysique réalisée en amont de carottages paléoenvironnementaux. En effet, les cartes de CEa et les sections électriques se sont avérées être des outils efficaces pour caractériser les contrastes sédimentaires de la subsurface à une échelle pluri-métrique. Les diagraphies donnent une approche des contrastes mécaniques et de résistivité à une échelle centimétrique. Ceci permet au géomorphologue d'acquérir une vision d'ensemble du comblement de la vallée et de cibler une zone d'implantation des carottages. Les carottes apportent un détail des structures sédimentaires et une interprétation paléoenvironnementale que ne peut fournir la géophysique.

La synthèse de ces informations permet une réinterprétation des milieux et des anomalies électriques identifiées sur les cartes de CEa et les sections électriques. Cette nouvelle interprétation offre de nouvelles perspectives à l'étude paléoenvironnementale, en optimisant l'implantation d'autres carottes pour répondre au mieux à la problématique. Pour conclure, la prospection géophysique apporte une réelle plus-value à l'étude paléoenvironnementale en offrant une vision continue et à grande échelle des environnements sédimentaires étudiés.

2 RECHERCHE DU PALÉO-COURS DE L'AUDE (NARBONNE)

La recherche du paléo-cours de l'Aude est réalisée dans le cadre du programme collectif de recherche « Le système portuaire narbonnais entre Méditerranée et Atlantique : du II^{ème} av. J.-C. au Bas Empire », coordonné par Corinne Sanchez. La zone d'étude se concentre entre les lieux-dits du Castélou et Mandirac et la ville de Narbonne (Figure 2.1). En ces lieux-dits, deux berges canalisant l'ancien bras sud de l'Aude, utilisées entre le I^{er} et le V^{ème} s. ap. J.-C., ont été mises en évidence par des prospections géophysiques et des sondages archéologiques (Mathé et *al.*, 2016). Elles sont larges de 15 à 25 m et espacées l'une de l'autre de 50 m dans leurs parties terminales (Figure 2.2). Une étude paléoenvironnementale a été effectuée pour retracer l'évolution de l'environnement sédimentaire de ce paléo-cours (Sanchez et *al.*, 2011 ; Mathé et *al.*, 2016 ; Faisse et *al.*, 2017).

Les prospections géophysiques de 2015 et 2016, réalisées dans ces travaux de thèse, avaient la volonté de faire le lien entre l'embouchure canalisée de l'Aude et la ville antique de Narbonne, distantes l'une de l'autre de 6 km. L'objectif était de retrouver le paléo-cours de l'Aude ainsi que de présumées structures portuaires entre Narbonne et l'embouchure canalisée, étudiée avant 2015. Nous sommes partis de l'hypothèse que cet ancien bras sud de l'Aude devait avoir un cours proche de celui du canal actuel de la Robine (Ambert, 2011 ; Cavero, 2011). En effet, une contrainte géologique est présente près de l'autoroute. L'ancien cours de l'Aude devait être contraint par les reliefs de l'ancienne terrasse alluviale de Lunes (Chapitre II : Figure 2.1), laissant un passage au paléo-cours d'une centaine de mètre de large. Les prospections géophysiques se sont concentrées sur les abords de ce canal, soit sur une surface d'environ 370 ha (Figure A). Comme la zone d'étude est très vaste, plusieurs zones ont été définies du sud (Castélou-Mandirac) vers le nord (Narbonne) : zone de Fringuet, de Craboulette et Craboules, de l'Étang du Cercle et de l'« autoroute » (Figure 2.1). Pour chaque zone, la démarche des prospections géophysiques est la même que celle utilisée dans la partie précédente (site du Pontet).

Les résultats des prospections et les interprétations préliminaires des anomalies identifiées seront détaillés pour chaque zone. Ensuite, la synthèse de ces données permettra d'acquérir une vision d'ensemble des contrastes sédimentaires (interprétation des anomalies) d'une partie de l'ancienne plaine alluviale de l'Aude. Ainsi, les anomalies identifiées comme de présumés paléo-chenaux seront mises en évidence. Une de ces anomalies a été désignée pour une campagne de carottages paléoenvironnementaux. Les résultats de ces carottages donneront une interprétation des structures sédimentaires. Une confrontation entre les carottages et les données géophysiques permettra une seconde évaluation de l'intérêt de cette démarche méthodologique faisant appel à la prospection géophysique en amont d'une campagne de carottages.

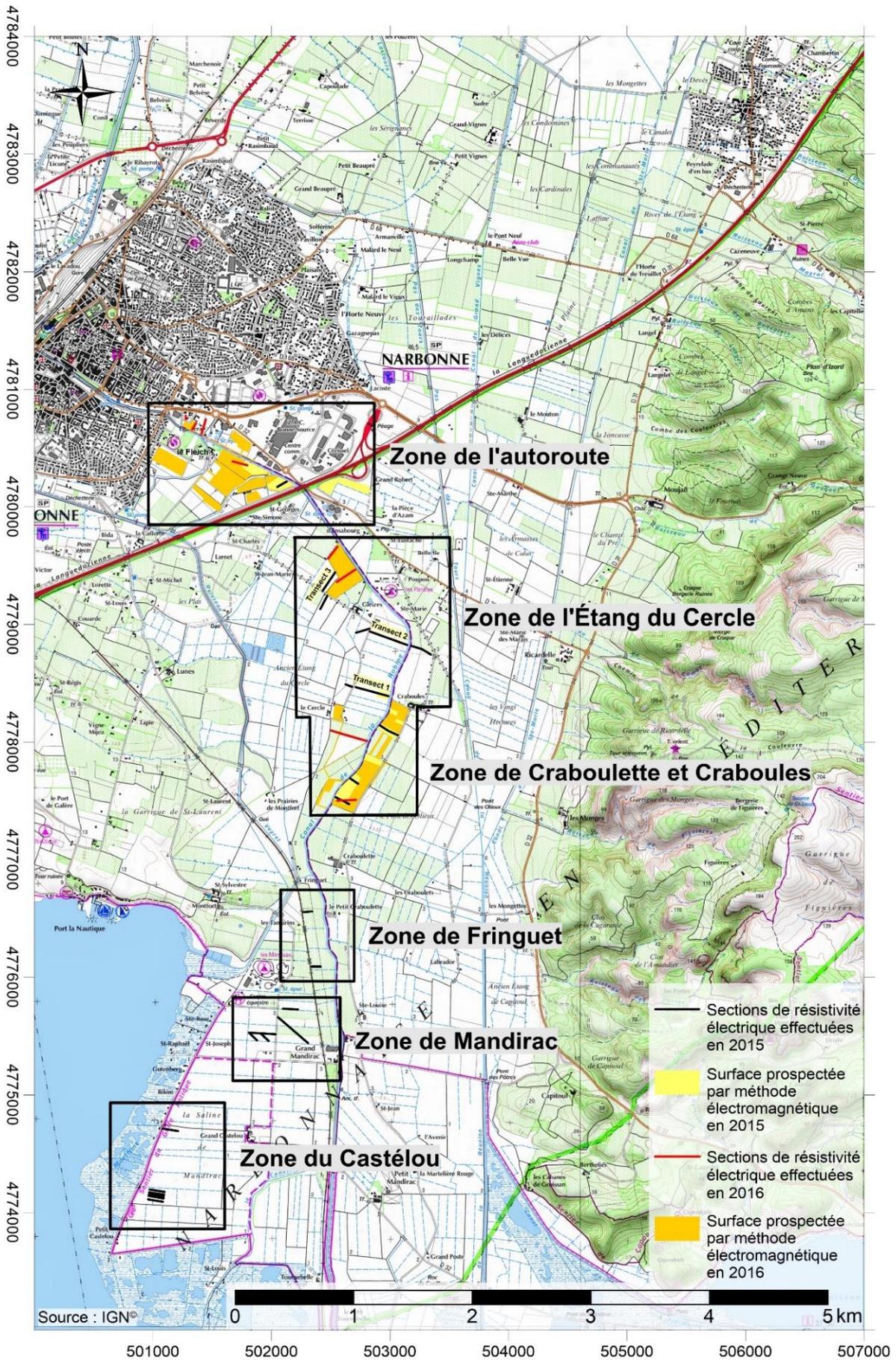


Figure 2.1 : Carte de la localisation des différentes zones de prospection pour la recherche du paléo-cours de l'Aude.

2.1 RÉSULTATS DES PROSPECTIONS GÉOPHYSIQUES

Les prospections électromagnétiques ont été réalisées avec les conductivimètres EM31-MK2 et EM38-MK2. Les sections électriques ont été effectuées avec un écartement inter-électrodes de 1 m et selon la configuration dipôle-dipôle. Un seul quadripôle a été utilisé et les raisons de ce choix sont argumentées dans la partie traitant de la zone du Castélou.

2.1.1 La zone du Castélou

Les prospections géophysiques sur la zone du Castélou (Figure 2.1) sont des sections électriques réalisées en compléments des prospections antérieures (Mathé *et al.*, 2016). Ces sections ont été réalisées en travers des berges antiques et du paléo-chenal (Figure 2.2). La section 1 est implantée à proximité d'une zone qui a été ouverte durant des sondages archéologiques sur les berges. Des carottages ont été effectués dans le paléo-chenal pour étudier l'évolution sédimentaire du chenal durant l'antiquité romaine. Cette section de résistivité a ainsi été confrontée aux structures archéologiques et sédimentaires mises en évidence par les sondages et les carottages. Ainsi, la section 1 sert de référence pour l'interprétation des anomalies électriques des autres sections de la zone du Castélou, réalisées 500 à 600 m plus au sud (section 2, 3, 4, 5 et 6). En effet, cette zone est un environnement de marais côtiers (forte salinité), nommée « la saline de Mandirac ». Le milieu est hyper-conducteur et l'interprétation des anomalies est rendue difficile sans informations extérieures (sondages et carottages). L'objectif de ces cinq dernières sections est d'étudier la terminaison des berges antiques.

2.1.1.1 La section de référence : la section 1

Sur la section 1 (Figure 2.3), les valeurs de résistivité électrique sont inférieures à 1 Ω .m et les contrastes de résistivité sont de l'ordre de 0,1 Ω .m. Les variations sont donc très faibles et il est nécessaire de savoir si elles sont significatives. La confrontation avec les carottages et les sondages archéologiques permettent de corréliser les milieux et anomalies électriques, identifiés sur cette section, avec les faciès sédimentaires identifiés et les interprétations archéologiques (Faisse *et al.*, 2017 ; Mathé *et al.*, 2016).

Les deux anomalies plus résistantes C et D (hachures jaunes) correspondent aux deux berges. La première est large de 25 m pour une épaisseur de 1,5 à 2 m et la seconde est large de 18 m pour 1 à 1,5 m d'épaisseur. Ces deux berges sont espacées d'une quarantaine de mètre l'une de l'autre. Elles sont composées de blocs calcaires et ont des résistivités comprises entre 0,5 et 1 Ω .m. Ces faibles résistivités sont induites par la salinité élevée du milieu.

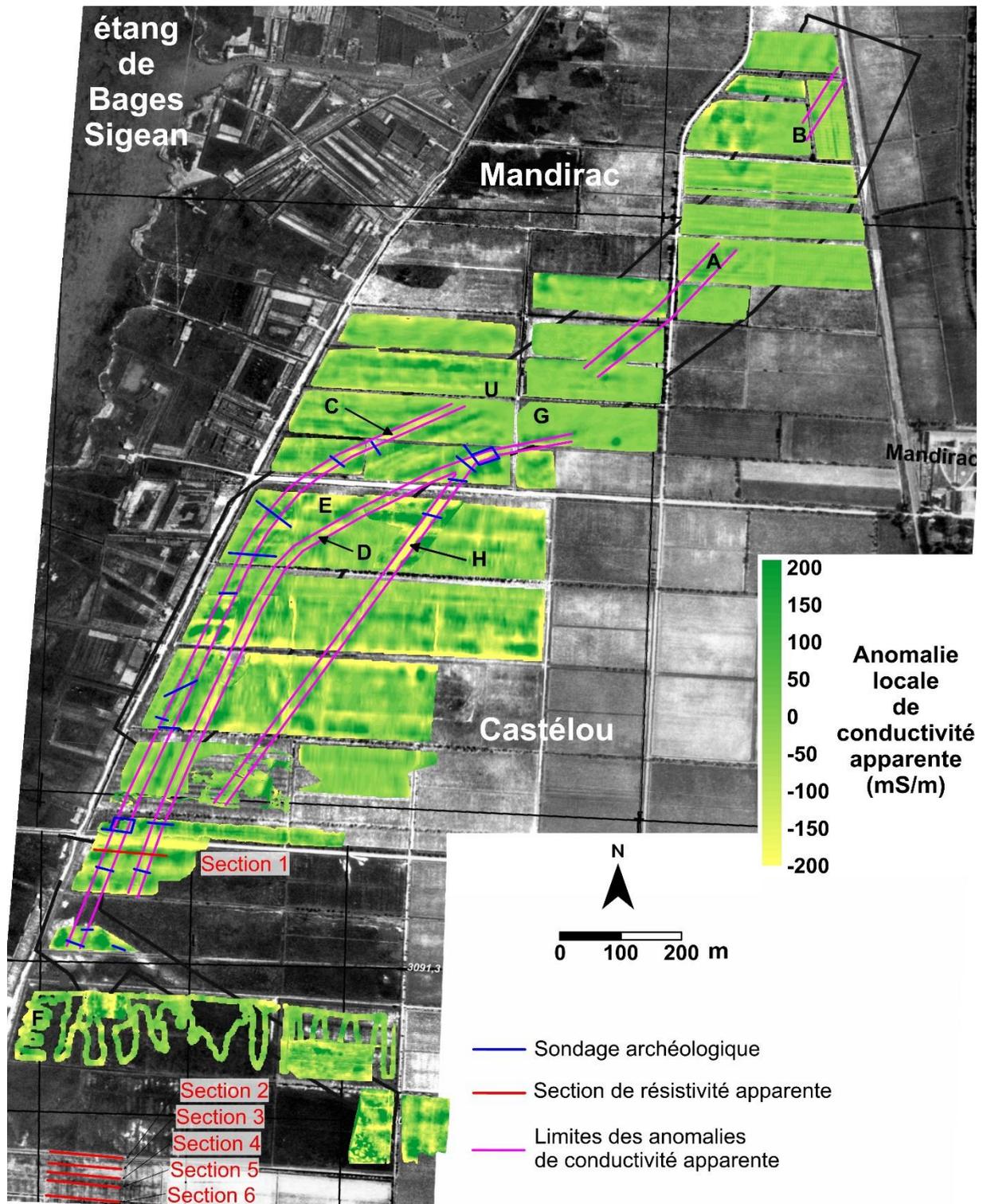


Figure 2.2 : Le paléo-cours sud de l'Aude et les berges antiques. Carte des anomalies de conductivité apparente précisant le paléo-cours de l'Aude et les deux berges romaines. Localisation des sections électriques 1, 2, 3, 4, 5 et 6 de la zone du Castélou (C et D ; Mathé et al., 2016).

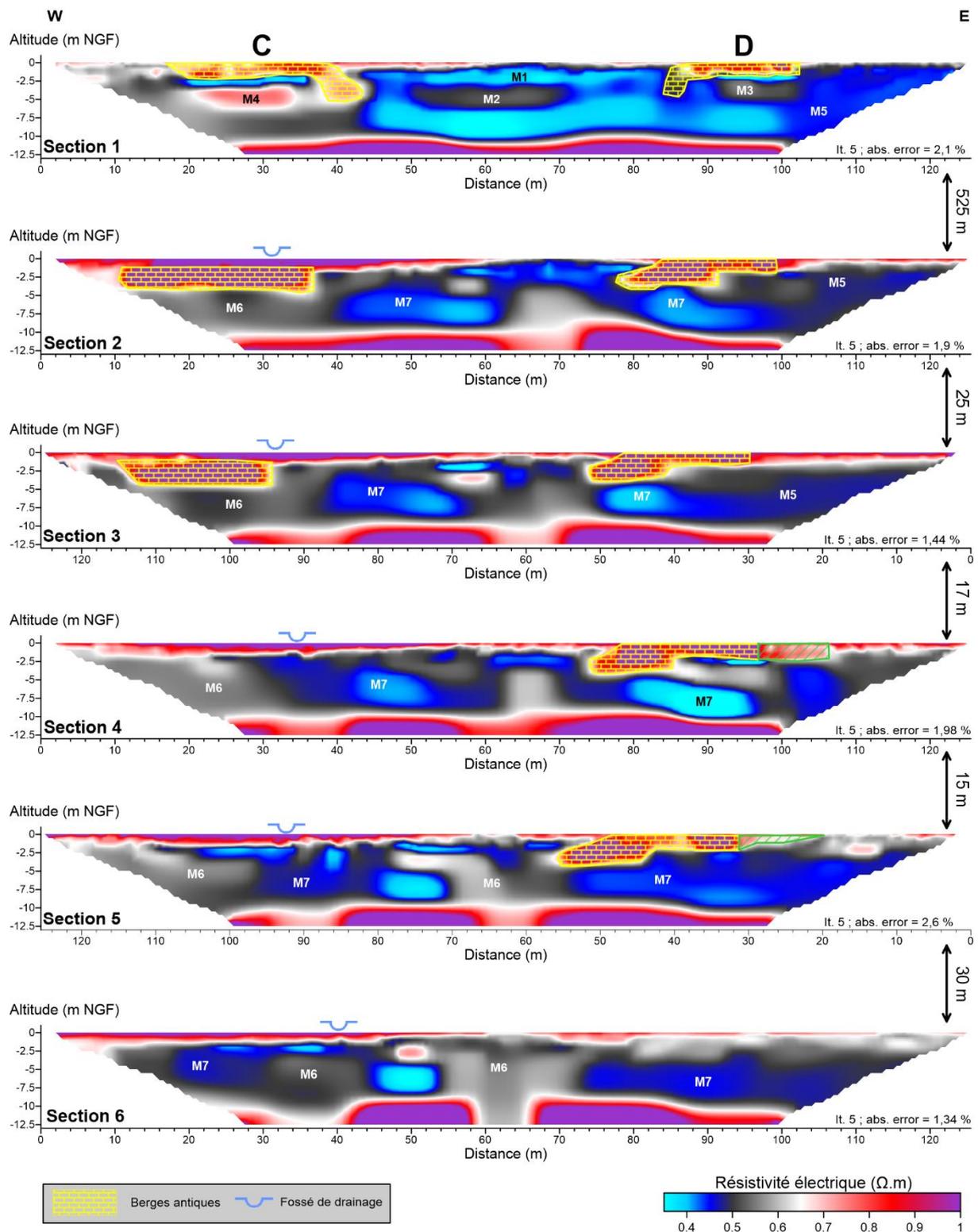


Figure 2.3 : Sections électriques réalisées dans la zone du Castéluou.

Le paléo-chenal de l'Aude est compris entre les deux berges C et D. Ce dernier est caractérisé par une anomalie plus conductrice M1 ($0,4 \Omega.m$) et une plus résistante M2 ($0,5 \Omega.m$). D'après les carottages, l'anomalie M2 correspond à une lentille de sable associée au fond du chenal. L'anomalie M1 correspond à des alluvions argileuses. Les deux berges reposent sur des anomalies plus résistantes, entre $0,5$ et $0,6 \Omega.m$ (M3 et M4), correspondant à des sédiments majoritairement sableux. Ces sables sont en plus grandes quantités sous la berge ouest (C). Ceci laisse penser que ces berges ont été élaborées sur des bancs de sables préexistants. Le banc de sable à l'est (M3) et le paléo-chenal repose sur un milieu plus conducteur (M5, inférieur à $0,45 \Omega.m$). Ce milieu correspond à des alluvions majoritairement argileuses déposées dans un environnement lagunaire calme. La base de la section correspond à un milieu plus résistant à une profondeur d'environ 10 m, contenant probablement moins d'argile que M5 (Faïsse et al., 2017 ; Mathé et al., 2016).

Les carottages de Castel 8, 9 et 10 (Faïsse et al., 2017), réalisées dans le paléo-chenal, sont schématisés sur la section 1 (Figure 2.4). La profondeur d'apparition des niveaux sableux du fond du chenal montre que la section 1 restitue correctement le milieu. Pour Castel 8, le niveau de sable est associé à une anomalie plus conductrice que sur Castel 9 et 10. Or sur Castel 8, le sable est plus grossier. Ceci est probablement induit par une plus forte porosité du sable grossier par rapport au sable moyen sur Castel 9 et 10. De ce fait, La concentration en sel soluble par volume de sédiment est plus importante au niveau de Castel 8 impliquant une résistivité.

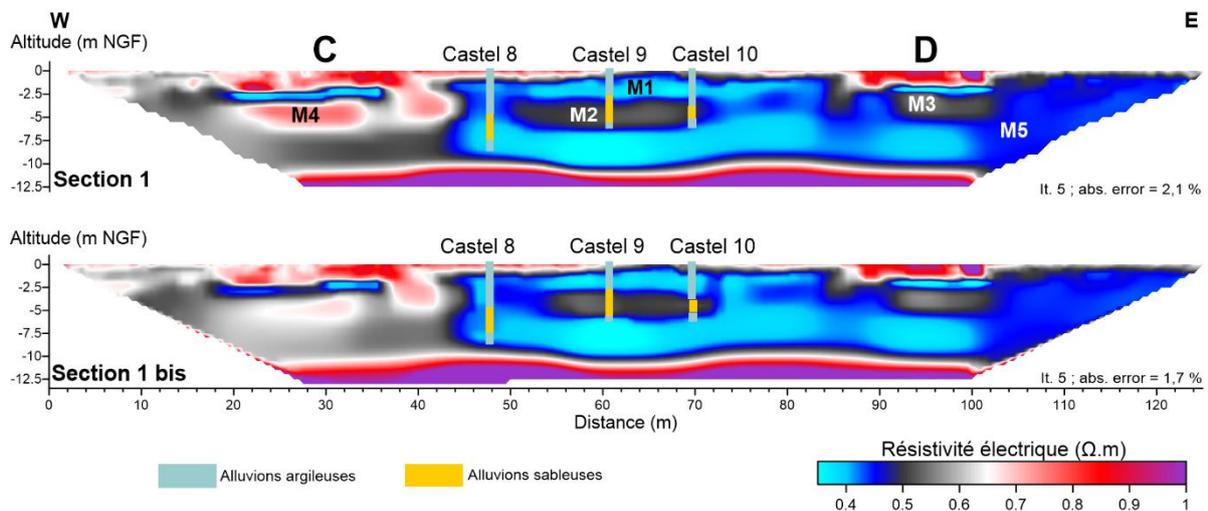


Figure 2.4 : Confrontation entre la section 1 et les carottages Castel 8, 9 et 10 (Faïsse et al., 2017). La section 1 bis correspond à la section 1 avec une inversion tenant compte des épaisseurs des alluvions argileuses et sableuses des carottes.

Sur cette section 1, une inversion des données électriques tenant compte des informations apportées par les carottes a été effectuée (appelé inversion *a priori*). Les blocs du modèle autour de 1,5 m de la position du carottage ont des résistivités fixées ($0,55 \Omega.m$ pour les sables et $0,3 \Omega.m$ pour les argiles). L'algorithme d'inversion est contraint par ces blocs pour calculer le modèle de résistivité. Comme il n'y a pas de données externes de résistivité (diagraphie), les valeurs fixées de résistivité sont définies à partir de la section 1 (pas d'information *a priori*). De ce fait, le modèle *a priori* n'est réalisée

que pour contraindre la géométrie des couches. Cette section *a priori* correspond à la section 1 bis. L'*inversion a priori* a été réalisée dans l'objectif d'influencer le modèle pour que le niveau de sable de Castel 8 est la même signature électrique que celui de Castel 9 et 10 (M2). La section 1 bis montre peu de changement au niveau de Castel 8 par rapport à la section 1. Ceci semble indiquer que le milieu électrique au niveau Castel 8 est plus conducteur que M2, même en contraignant l'inversion pour le faire tendre vers un milieu plus résistant. Ce constat pourrait confirmer que c'est bien la porosité du sable qui est responsable d'une plus faible résistivité que celle de l'anomalie M2.

La confrontation entre la section 1 et les carottes montrent que la configuration dipôle-dipôle restitue bien les différents milieux et anomalies électriques en lien avec des structures archéologiques et sédimentaires. De ce fait, les autres sections seront réalisées avec ce dispositif.

2.1.1.2 La terminaison des deux berges

Les sections 2, 3, 4, 5 et 6 ont été effectuées à plus de 500 m plus au sud par rapport à la section 1 (Figure 2.2). Elles ont été réalisées pour caractériser la fin des deux berges et de la canalisation de l'embouchure de l'Aude. Les sections 2, 3, 4, 5 et 6 sont présentées sur la Figure 2.3. On constate que les deux berges sont encore sur la section 3 et que la berge ouest (C) se termine entre les sections 3 et 4. En revanche, la berge est (D) disparaît entre les sections 5 et 6, soit environ 30 m après la berge ouest. L'ensemble des sections 2 à 6 présente des milieux et des anomalies électriques semblables à celles détaillées pour la section 1. Les milieux plus résistants (M6) et plus conducteurs (M7) caractérisent probablement des variations granulométriques (texture) dans le sédiment.

2.1.2 La zone de Mandirac

Des sondages archéologiques, des cartes de conductivité électrique apparente (CEa) et des cartes d'anomalies magnétiques ont été réalisées entre 2009 et 2015 dans la zone de Mandirac (Figure 2.5). La carte magnétique synthétique met en évidence une succession d'anomalies magnétiques linéaires. Elles sont associées à la divagation d'un ancien cours d'eau. L'ensemble de ces anomalies met en avant la présence d'un méandre du fleuve en amont du secteur chenalisé par les berges antiques. L'anomalie linéaire (orientée NE-SW, appelée C) est identifiée sur plusieurs centaines de mètres. Elle semble correspondre au plus ancien lit visible du fleuve : la majorité des anomalies magnétiques linéaires sont parallèles à l'anomalie C et les autres anomalies la recoupent au niveau des deux berges (Mathé et al., 2016). La direction du fleuve est quasi N-S au sud du méandre. Les sections de résistivité viennent donc en complément de ces opérations. Les sections dans la zone de Mandirac ont été réalisées avec l'objectif de caractériser la stratigraphie générale du fleuve et ses divagations

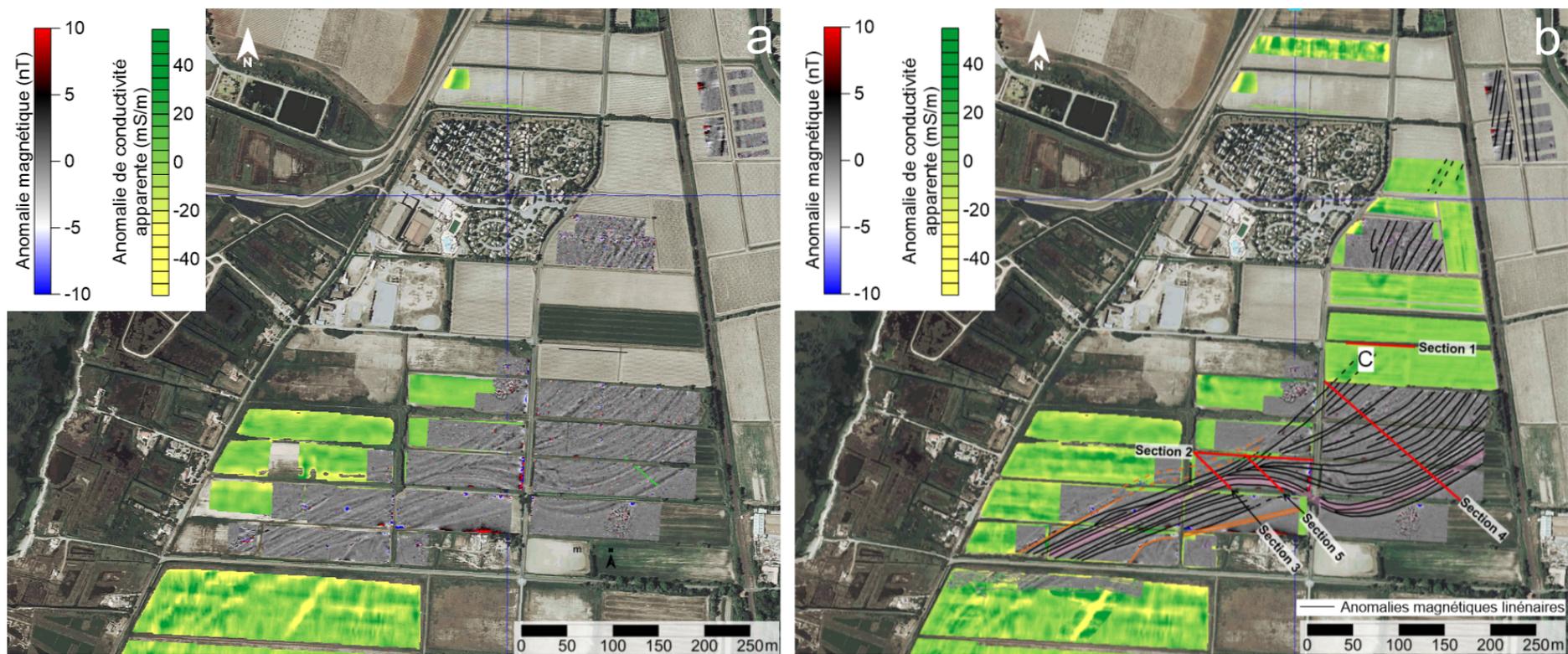


Figure 2.5 : Résultats des prospections électromagnétiques et magnétiques réalisées entre 2009 et 2015 sur la zone de Mandirac. (a) Carte des anomalies de conductivité apparente et carte du gradient magnétique vertical, sans annotation. (b) Carte des anomalies de conductivité apparente et carte du gradient magnétique vertical avec annotations et localisation des sections de résistivité effectuées en 2015 (d'après Mathé et al., 2016).

À partir de ces informations, cinq sections ont été positionnées de manière à caractériser les anomalies électriques associées aux différents chenaux du fleuve et à ses divagations (Figure 2.5). Les gammes de résistivité sont plus élevées que celles dans la zone du Castérou. Les résistivités varient entre des valeurs inférieures à 1 Ω .m jusqu'à plus de 70 Ω .m. Les valeurs les plus élevées sont présentes en surface, ce qui indique une salinité de l'eau interstitielle plus faible en surface qu'en profondeur. L'échelle de couleur a été adaptée en conséquence. Elle sera gardée pour toutes les autres sections.

Les sections 2, 3 et 5 (Figure 2.6) sont localisées à la confluence des anomalies magnétiques linéaires (Figure 2.5). De la base jusqu'à -5 m de profondeur, ces sections sont caractérisées par un milieu électrique N1 très conducteur (inférieur à 2,5 Ω .m). Il correspond vraisemblablement aux vases lagunaires identifiées à la base des sections dans la zone du Castérou (milieu M5 ; Figure 2.3). Ces sections 2, 3 et 5 montrent que les résistivités électriques de la subsurface augmentent du NW vers le SE dans les cinq premiers mètres sous la surface (Figure 2.6). La partie la plus conductrice au NW est caractérisée par un milieu N2 (entre 2,5 et 5 Ω .m), proche de la signature électrique de N1. Cependant, elle présente de nombreuses hétérogénéités légèrement plus résistantes de 1 Ω .m, visibles sur la section 2. Des essais pénétrométriques réalisés en parallèles de la section indiquent la présence de passées plus sableuses dans le sédiment (Sanchez, 2013). Le milieu N3 est légèrement plus résistant que N2 (entre 5 et 10 Ω .m) et pourrait traduire une fraction sableuse plus importante. Sur ces sections 2, 3 et 5, les positions des anomalies C et F, respectivement le chenal supposé le plus ancien et le plus récent, sont indiquées. La signature électrique du paléo-chenal C correspond à N2 et N3. En revanche, le paléo-chenal F est associé aux milieux N4 et N5. Ces derniers sont plus résistants que les deux autres : les résistivités de N4 sont comprises entre 10 et 20 Ω .m et entre 20 et 50 Ω .m pour N5. L'augmentation progressive des résistivités vers le SE pourrait correspondre à un enrichissement de la fraction sableuse du sédiment. Ainsi, le chenal C serait composé d'une sédimentation plus fine que le chenal F.

La section 4 recoupe l'ensemble du méandre (Figure 2.7). Les différents milieux électriques (N1, N2, N3 et N4) se retrouvent sur cette section. L'augmentation des résistivités vers le SE est toujours observée. Le milieu le plus résistant est localisé à l'est de la section 4 avec des résistivités supérieures à 50 Ω .m. Ce milieu correspond à une berge naturelle du fleuve. Sur cette section, les signatures électriques des paléo-chenaux C et F sont similaires à celles décrites sur les sections précédentes. Le paléo-chenal C sur la section 4 possède une géométrie semblable à celle observée sur la section 1 de la zone du Castérou (Figure 2.3). En effet, il possède une lentille plus résistante surmontée d'un milieu plus conducteur (Figure 2.7). D'autres anomalies électriques semblent aussi correspondre à des paléo-chenaux sur cette section 4, ils sont indiqués par des pointillés noirs. L'interprétation de ces anomalies en tant que paléo-chenaux est principalement basée sur leur morphologie en forme de cuvette et la présence d'une anomalie plus conductrice à leur base.

Sur la section 1, située plus au nord (Figure 2.5), le paléo-chenal est toujours caractérisé par le milieu N3. Il est bordé par le milieu plus résistant N4. Sur cette section, le paléo-chenal est bien limité. Il est large d'une trentaine de mètres pour une profondeur estimée à 6,5 m.

L'ensemble des sections électriques réalisées dans la zone de Mandirac a été effectué en complément des prospections électromagnétiques et magnétiques. Ces prospections ont permis d'identifier le plus ancien chenal visible (C). Ces données ont permis une interprétation plus aisée des modèles de résistivité de la subsurface proposés par les sections électriques. Sur ces sections de la zone de Mandirac, le paléo-chenal C possède une géométrie et une stratigraphie qui se rapproche de celle observée dans la zone du Castélou, même si les gammes de résistivité sont très différentes. Ces informations sont des données importantes pour la suite des prospections car aucune autre campagne d'investigation n'a été réalisée entre la zone de Mandirac et la ville de Narbonne. De ce fait, la recherche du paléo-cours de l'Aude dans les zones plus au nord se base sur les observations faites dans la zone de Mandirac.

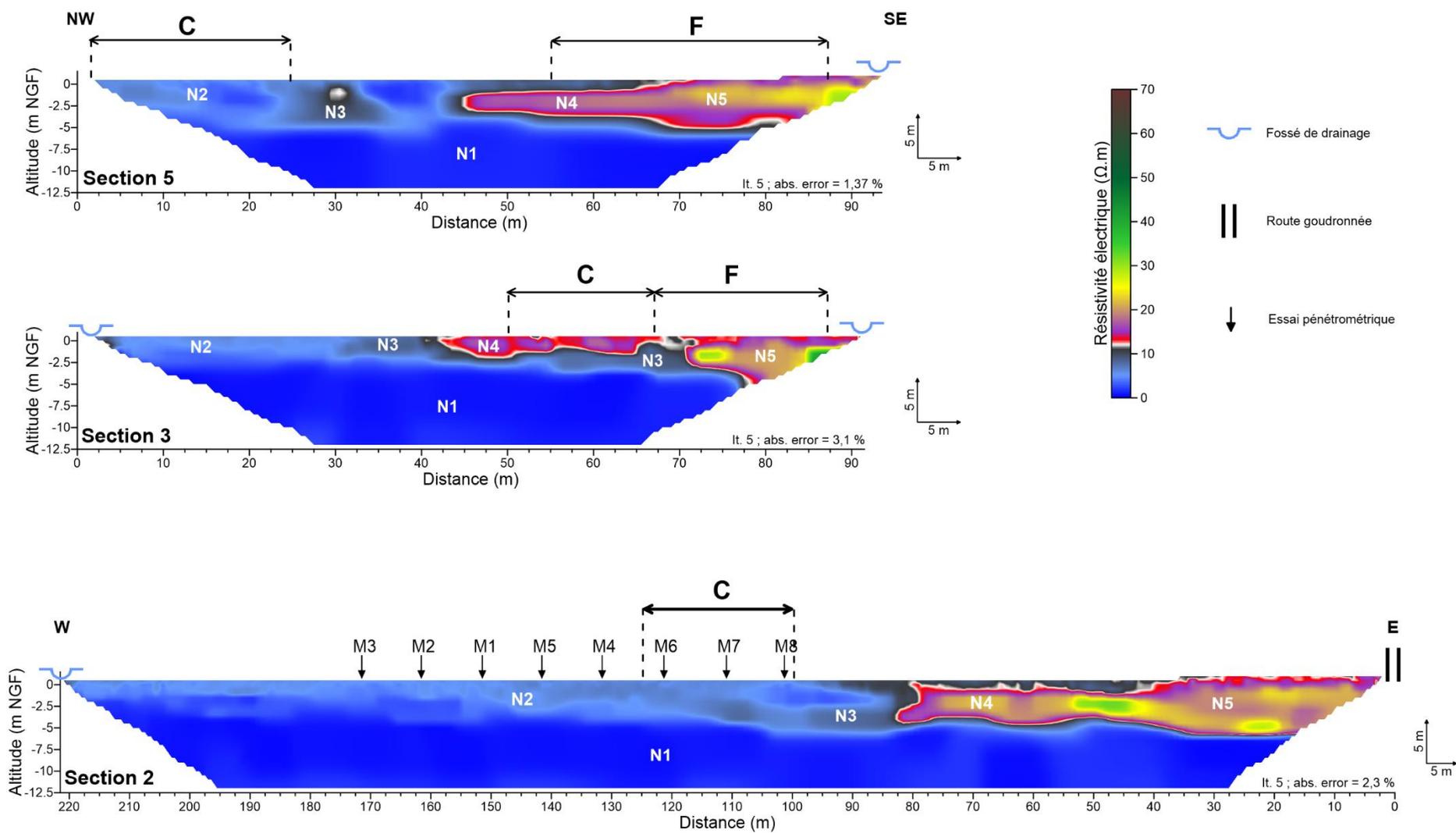


Figure 2.6 : Sections de résistivité réalisées dans la zone de Mandirac, près l'embouchure canalisée de l'ancien cours de l'Aude. La position du chenal le plus ancien correspond à C et le plus récent à F.

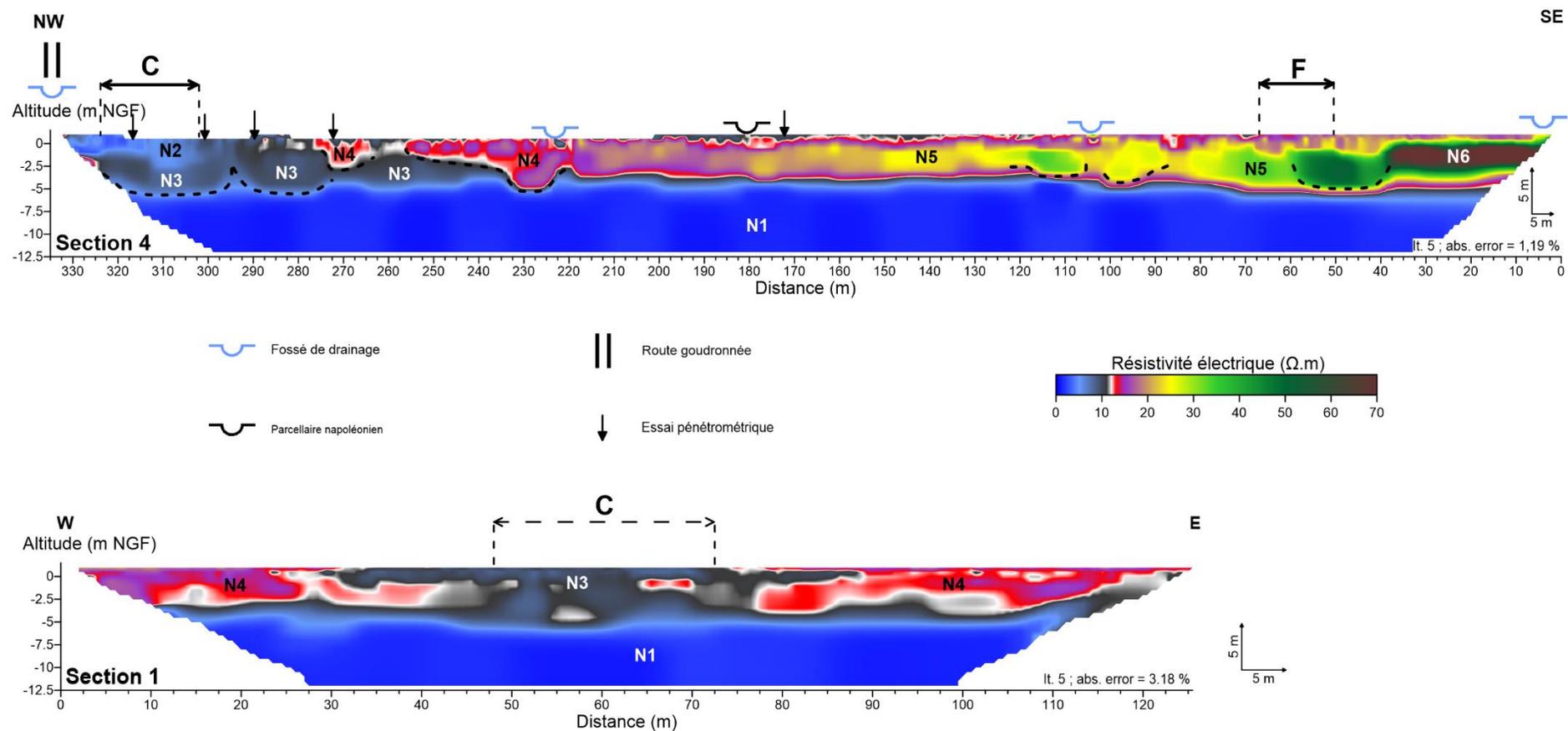


Figure 2.7 : Sections de résistivité réalisées dans le méandre de la zone de Mandirac. Les courbes pointillées sur la section 4 indiquent la position probable de paléo-chenaux. La position du chenal le plus ancien correspond à C et le plus récente à F.

2.1.3 Au nord de Mandirac : le lieu-dit Fringuet

Les prospections géophysiques réalisées sur la zone de Mandirac ont montré que l'ancien cours de l'Aude avait une direction quasi N-S avant le méandre et l'embouchure canalisée. Afin de localiser le paléo-chenal et ses divagations, des sections électriques ont été implantées au sud du lieu-dit Fringuet (Figure 2.8a), soit à une distance de plus de 400 m de Mandirac. Deux sections électriques ont été positionnées entre le canal de la Robine et la voie de chemin de fer.

Les sections sont présentées sur la Figure 2.8b. La section 1 montre des milieux électriques très similaires aux sections de la zone Mandirac. La base de la section 1 présente le milieu N1 correspondant aux vases lagunaires. Les formations situées au-dessus correspondent à N3 et N4 et elles sont semblables à celles identifiées sur les sections 1 et 4 (paléo-chenal C) de la zone de Mandirac (Figure 2.7). Ainsi, le milieu N3 de la section 1 de Fringuet correspond probablement à l'anomalie électrique du paléo-chenal C (Figure 2.8b). Cette anomalie C est bordée par le milieu N4 dans la partie est de la section. La partie ouest de l'anomalie est sous la voie ferrée.

La section 2, localisée à 475 m plus au nord de la section 1, détecte essentiellement les milieux N4 et N5. Le milieu N3 repose sur N4 dans la partie ouest de la section. Si la morphologie est similaire aux sections de Mandirac, alors il est possible que l'anomalie C soit légèrement plus à l'ouest de la section 2 : soit sous la voie ferrée.

Ces deux sections, notamment la section 1, montrent une probable continuité de l'anomalie électrique C correspondant à un paléo-chenal. La continuité de cette anomalie a été recherchée plus nord, vers la zone des lieux-dits de Craboulette et Craboules (Figure 2.1).

2.1.4 Les zones de Craboulette et Craboules, de l'Étang du Cercle et de l'autoroute

Les prospections géophysiques sur les zones de Craboulette et Craboules, de l'Étang de Cercle et de l'« autoroute » seront présentées ensemble. En effet, les sections électriques dans les zones précédemment présentées ont été réalisées en complément de l'étude sur l'embouchure aménagée du fleuve. Des données géophysiques, archéologiques et paléoenvironnementales étaient disponibles pour argumenter les interprétations des anomalies électriques identifiées sur les sections électriques.

Sur les zones de Craboulette et Craboules, de l'Étang de Cercle et de l'« autoroute », peu d'information sont disponibles pour argumenter les interprétations des anomalies électriques identifiées. Les cartes de conductivité électrique apparente (CEa) réalisées sur ces trois zones sont présentées sur la Figure 2.9. Les sections électriques sont numérotées par zones, comme précédemment.

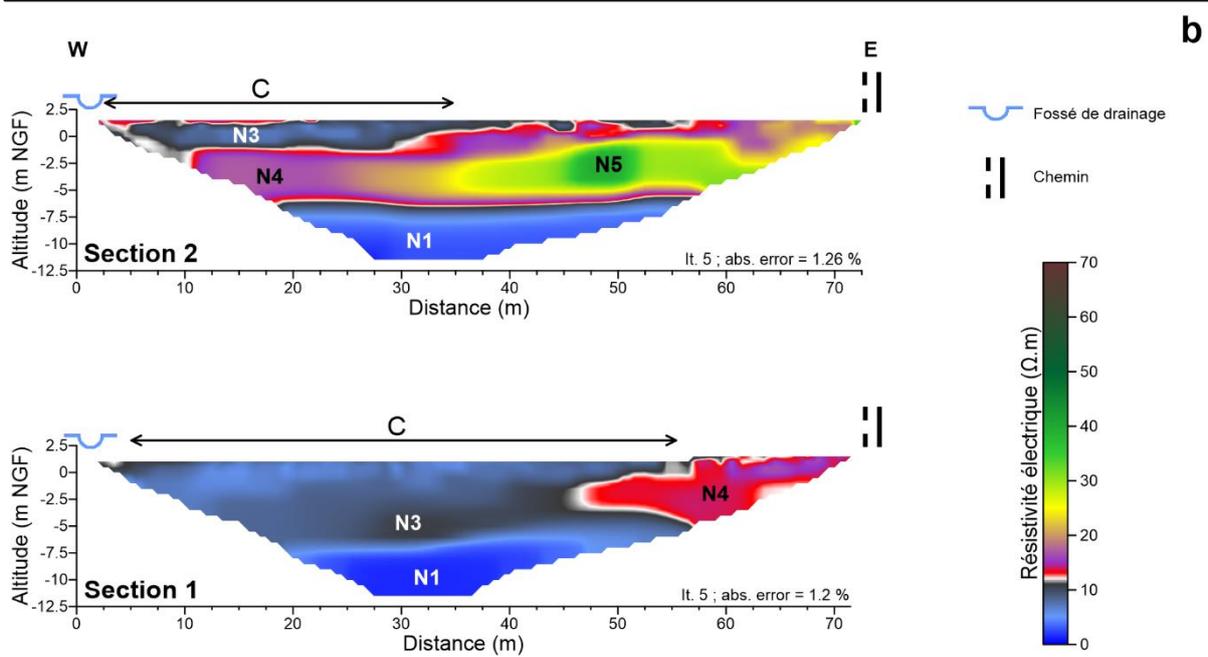
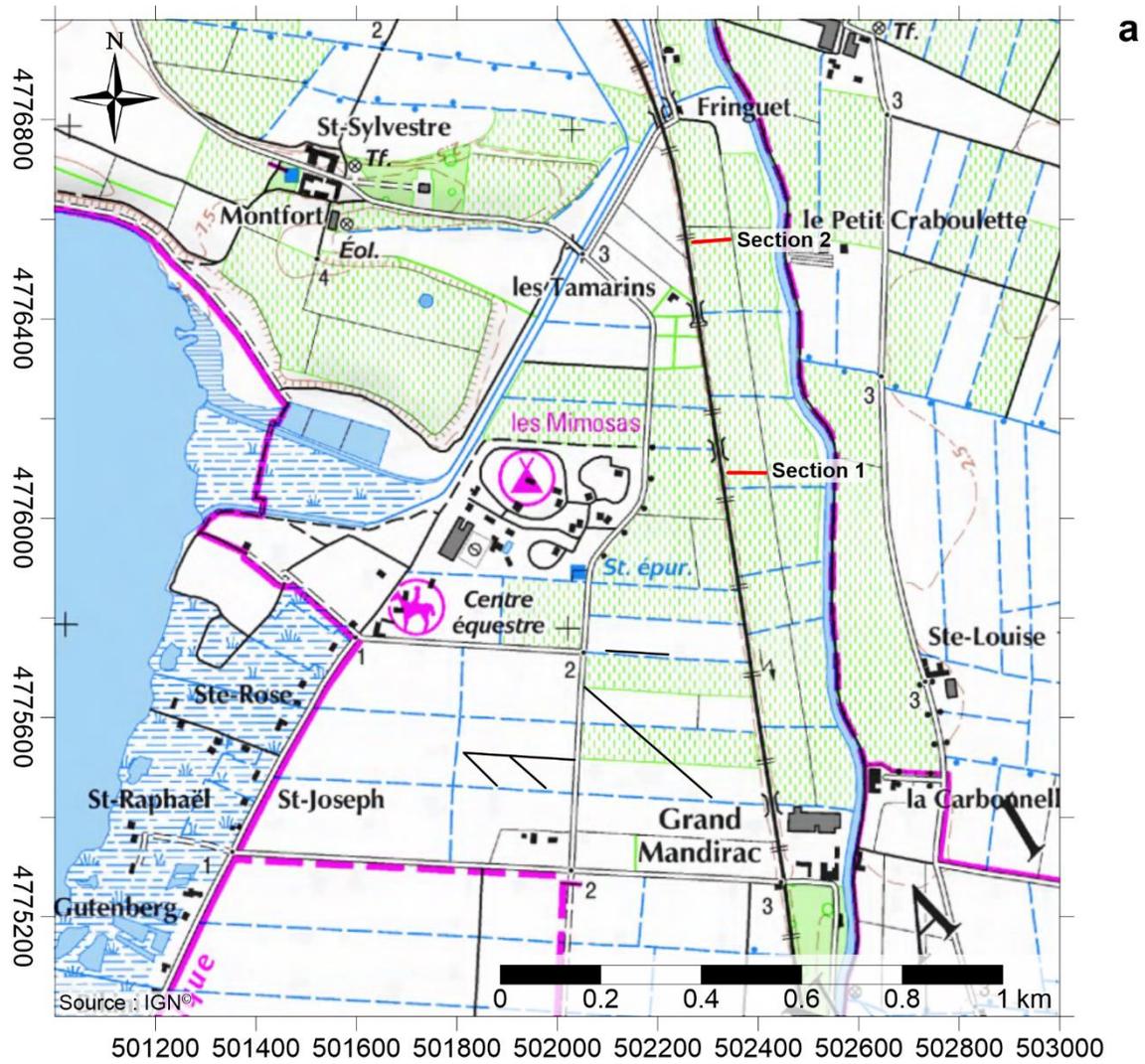


Figure 2.8 : (a) Localisation des sections de résistivité sur le lieu-dit Fringuet. (b) Sections électriques réalisées au lieu-dit Fringuet.

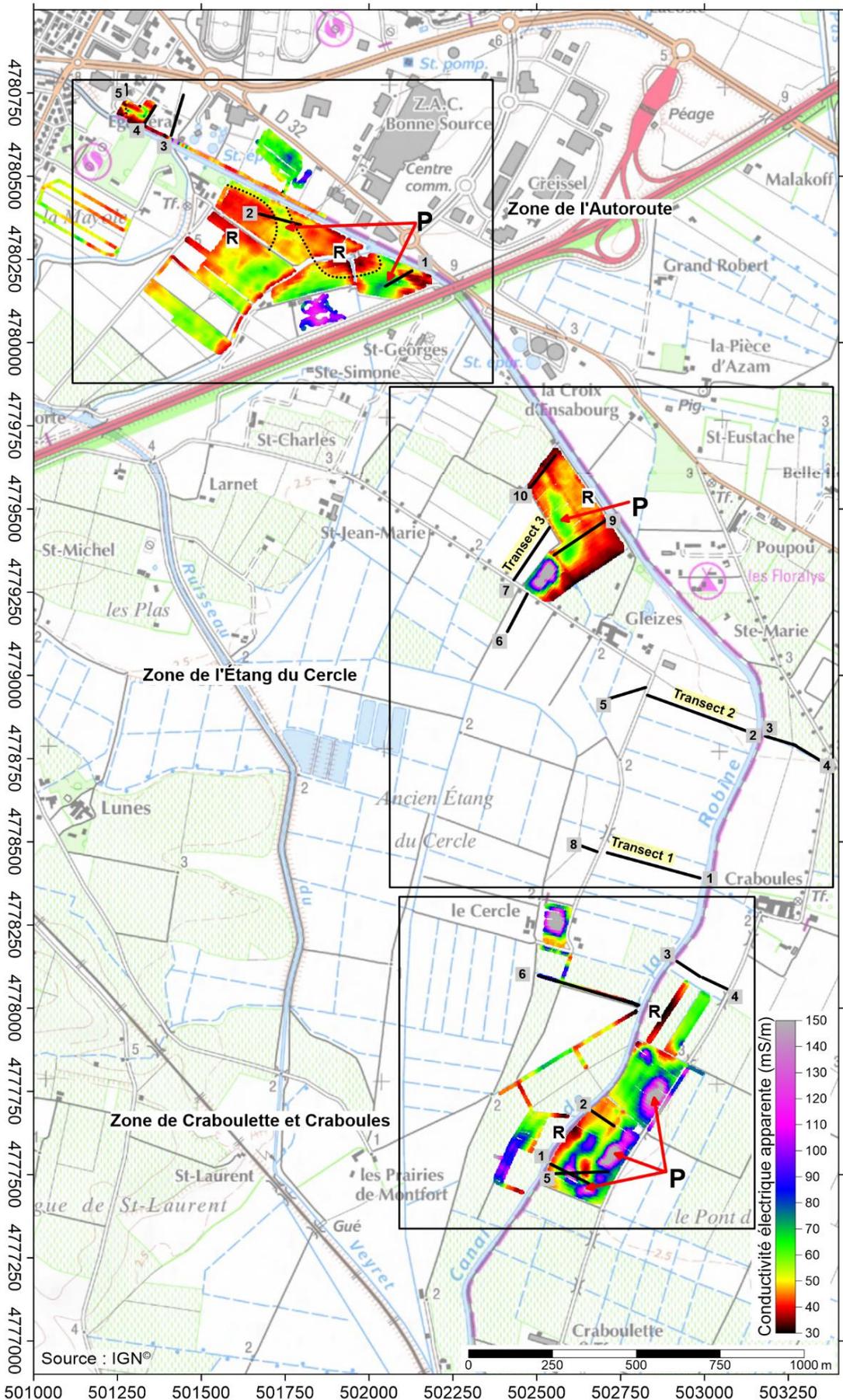


Figure 2.9 : Cartes de la conductivité apparente et localisation des sections électriques sur les zones de Craboulette et de Craboules, de l'Étang du Cercle, et de l'« autouroute ».

2.1.4.1 Cartes de la conductivité électrique apparente

Les cartes de CEa ont été acquises à l'EM31 et les parcelles ont été prospectées suivant leur accessibilité, d'où la mosaïque de zones investiguées. Les prospections électromagnétiques se sont focalisées sur les parcelles en bordures de la Robine. Près de ce canal, les CEa sont plus élevées à cause de l'effet de drainage ; il en est de même à proximité des canaux secondaires (Camus, 2008 ; Camus et al., 2011). Les cartes de CEa présentent deux grands types d'anomalie de conductivité : les anomalies plus résistantes (R : inférieure à 50 mS/m) et plus conductrices (P : supérieure à 50 mS/m). Ces dernières possèdent des formes allongées qui suivent approximativement le canal de la Robine. Cette orientation est clairement visible sur les anomalies P dans les zones de l'Étang du Cercle et de Craboublette et Craboules. Dans la zone de l'« autoroute », l'anomalie P est parallèle au canal de la Robine (direction SW-NE) puis sa direction dévient quasi N-S plus au sud. D'après la géométrie de ces anomalies plus conductrices P, il est probable qu'elles correspondent à des paléo-chenaux.

2.1.4.2 Sections de résistivité électrique

Dans ces trois zones, 20 sections électriques ont été réalisées. Le transect 1 de la zone de l'Étang du Cercle est présenté sur la Figure 2.10. Ce transect résume bien les milieux électriques composant la subsurface dans ces trois zones. De ce fait, seul ce transect sera présenté ; les autres sections électriques sont mises en Annexe 2 de la thèse. Le transect 1 est composé par les sections électriques 1 et 8. Il s'étend d'est en ouest sur une distance d'environ 380 m. Il permet d'identifier de grands ensembles caractérisés par leurs propriétés électriques. Un premier ensemble plus résistant (nommé E1) est composé par les milieux électriques N5 et N4. Il est localisé à proximité du Canal de la Robine et s'étend jusqu'à la moitié de la section 1. Il possède une épaisseur d'environ 8,5 m vers l'ouest (près de la Robine) et s'amincit vers l'est (environ 2 m d'épaisseur à son extrémité est).

L'ensemble plus conducteur (nommé E2) est identifié par les milieux N1 et N2. Il est localisé sous E1 (à environ -8,5 m d'altitude) puis sa profondeur d'apparition augmente au fur et à mesure que l'épaisseur d'E1 décroît vers l'est. Cet ensemble E2 est affleurant dans la seconde moitié de la section 1. En surface, la transition entre E1 et E2 (au niveau de la position 170 m de la section 1) est associée à une anomalie topographique linéaire identifiée sur des relevés lidar (Annexe 2 : Figure 2).

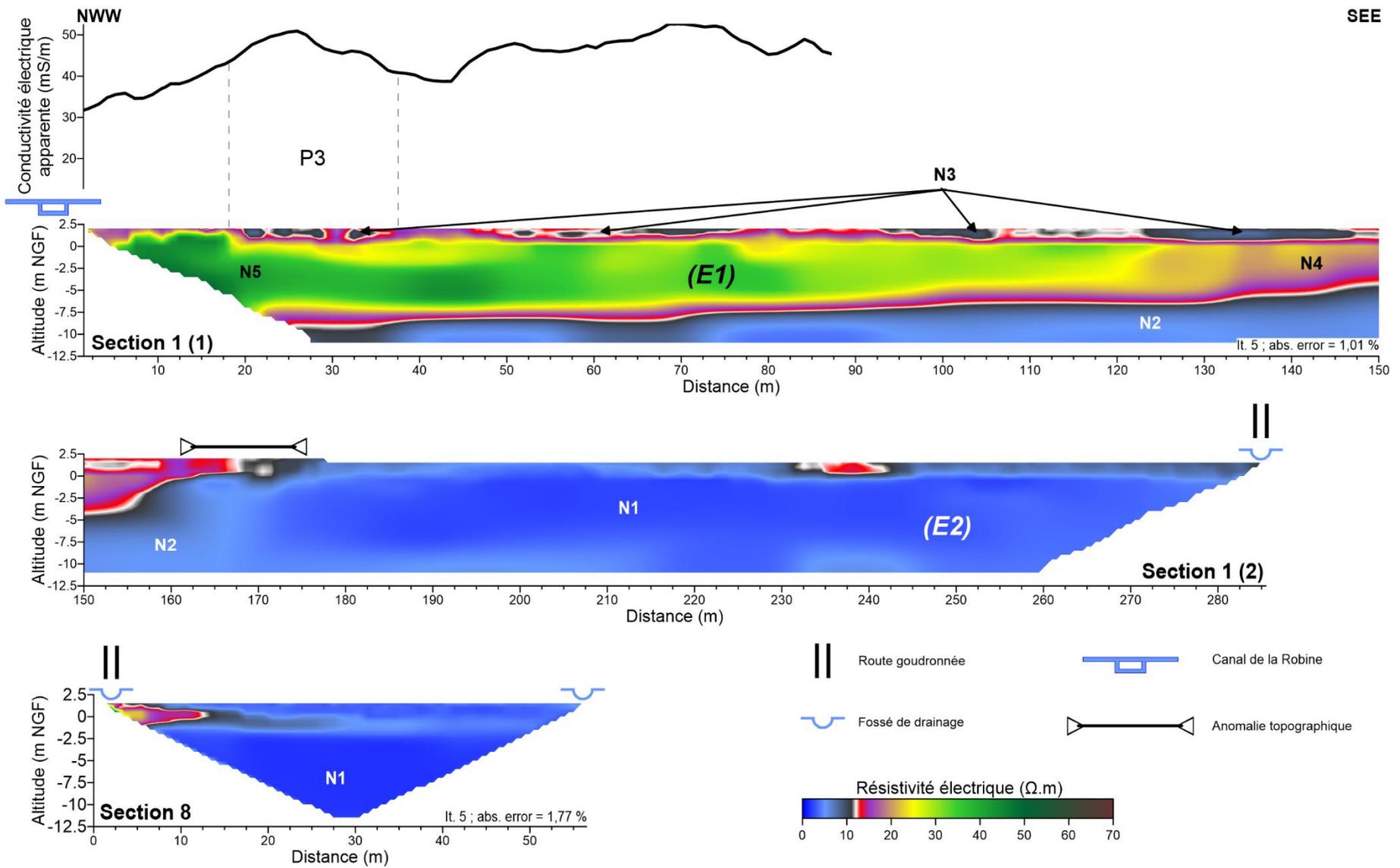


Figure 2.10 : Transect de résistivité électrique 1, composé des sections 1 et 8 de la zone de l'Étang du Cercle.

L'ensemble E1 est composé par des milieux plus résistants dont les valeurs de résistivité correspondent à des matériaux sableux (supérieures à 15 Ω .m). E1 présente la forme d'une grande « demi-cuvette » (170 m de long sur la section 1) dont la partie la plus profonde (plus de 10 m d'épaisseur) est localisée au niveau de la Robine. Cet ensemble semble correspondre à des dépôts sédimentaires de la plaine alluviale de la Robine (dépôts de l'ancien cours de l'Aude). E1 est donc probablement composé, en majorité, par des alluvions sableuses. L'ensemble E2 possède une signature électrique conductrice avec des valeurs de résistivité inférieures à 10 Ω .m. De ce fait, E2 est probablement composé par des matériaux argilo-limoneux. Il pourrait correspondre aux vases lagunaires identifiées dans les zones de Craboules et de Mandirac. Cependant, la partie plus à l'est de l'ensemble E2 (partie est de la section 1 et milieu N1 de la section 8) pourrait aussi être associée à des dépôts d'alluvions fines de l'ancien Étang du Cercle.

Dans les parties superficielles de ce transect, des structures en creux composées par le milieu N3 sont présentes. Ces structures en creux, de largeur variable mais d'une profondeur inférieure à 1,5 m, ne semblent pas être associées à des chenaux.

Les transects 2 et 3 de l'Étang du Cercle, ainsi que la section 6 de la zone de Craboulette et Craboules, mettent en évidence les mêmes ensembles et milieux électriques que le transect 1. Ces derniers sont très intéressants car ils décrivent probablement l'extension latérale et verticale de l'ancienne plaine alluviale de l'Aude.

2.1.5 Zone d'implantation des carottages

2.1.5.1 Carte de la conductivité apparente

La Figure 2.11a présente un agrandissement de la carte de conductivité électrique apparente (CEa) de la zone de Craboulette et Craboules. La carte de CEa montre la présence d'une anomalie plus conductrice P (nommée par la suite P1). Cette dernière possède des CEa supérieure à 70 mS/m et présente la forme d'un méandre. Cette anomalie P1, large d'une cinquantaine de mètres, est composée de plusieurs secteurs successifs, interrompus par des bandes plus résistantes liées aux effets de drainage des canaux anthropiques (Camus, 2008 ; Camus et *al.*, 2011). La largeur de cette anomalie est proche de celles du paléo-chenal des zones du Castélou et Mandirac. L'anomalie P1 présente des caractéristiques, tant en termes de conductivité que de dimensions, semblables aux paléo-chenaux recherchés. Sur la rive ouest du canal de la Robine, la carte de CEa met en évidence les deux zones plus résistantes (R) qui ont été nommées séparément R2 (au nord) et R1 (au sud). Ces anomalies plus résistantes (inférieurs à 50 mS/m) pourraient correspondre à des zones plus sableuses. Une structure résistante de forme rectangulaire (R3), 35 m de large sur 65 m de long, a été identifiée sur la carte de CEa, au centre de la structure très conductrice P1. Elle possède la même signature que les structures R1 et R2 mais ne peut être associée à un effet de drainage car elle n'est pas dans l'orientation des canaux.

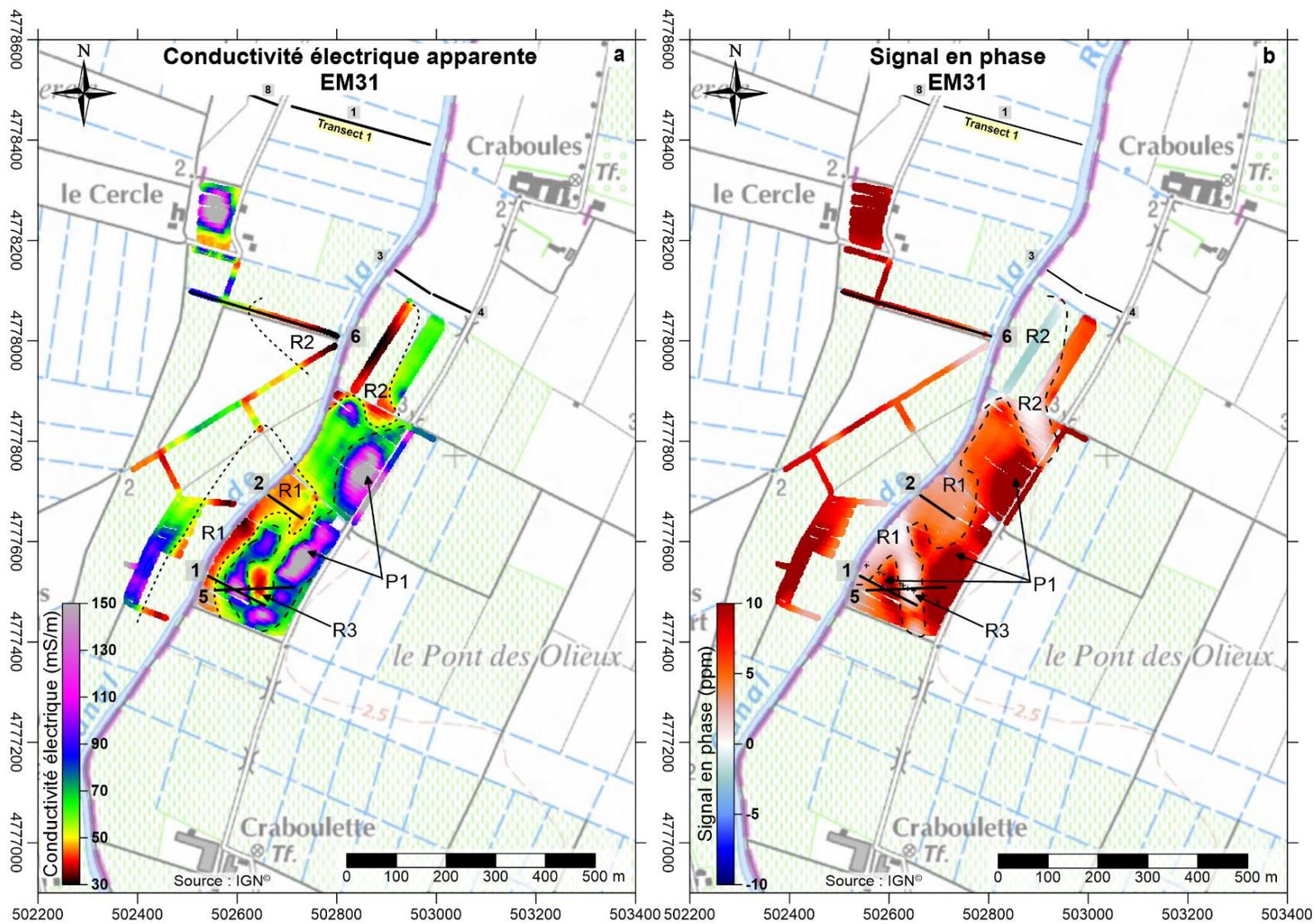


Figure 2.11 : Prospections électromagnétiques avec le conductivimètre EM31 dans la zone de Craboules et Craboulette. (a) Carte de la conductivité électrique apparente pour une profondeur d'investigation comprise entre 1,5 à 5 m. (b) Carte du signal en phase.

2.1.5.2 Carte du signal en phase

La carte du signal en phase est représentée sur la Figure 2.11b. Les anomalies très conductrices caractérisant P1 sont associées à de fortes variations positives du signal en phase. Ceci indique qu'elles sont composées de sédiments fins (argiles). Les fortes conductivités sont liées à la présence d'eau salée dans ces formations.

Les zones résistantes caractérisant les anomalies R1, R2 et R3 sont associées à des variations très faibles du signal en phase (quasi nulle). Ceci est cohérent avec les valeurs faibles de la conductivité et pourrait indiquer des zones avec des teneurs en argile moins importantes que les zones plus conductrices.

Cependant, les géométries des zones R1, R2 et R3 sur la carte du signal en phase sont particulières. En effet, les anomalies R1 et R3, bien différenciées sur la carte de conductivité (Figure 2.11a), semblent être une seule et même structure sur la carte du signal en phase (Figure 2.11b). L'ensemble R1-R3 apparaît comme une anomalie de forme allongée orientée N-S et large d'une quarantaine de mètres. Cet ensemble R1-R3 passe au travers de l'anomalie très conductrice P1, présentant un fort contraste avec le signal en phase de P1. Cependant, ce contraste n'est pas visible sur la carte de conductivité électrique (Figure 2.11). Une autre anomalie du même type est visible plus au nord, au niveau de la zone R2 (Figure 2.11b). Elle présente les mêmes caractéristiques que l'ensemble R-R3 avec une forme allongée, orientée N-S, et large d'environ 40 m. Ces deux anomalies sont donc parallèles entre-elles et distantes de 290 m. Les dimensions et l'orientation de ces dernières ne correspondent pas à d'anciens canaux anthropiques. Cependant, le fait qu'elles soient parallèles semble indiquer qu'elles ont une origine plus anthropique que naturelle. De plus, l'orientation de ces anomalies correspond à la direction que prend le Canal de la Robine après le lieu-dit Craboulette (orientée NE-SW entre Craboules et Craboulette). La section électrique 5 est positionnée en travers de l'anomalie plus résistante R3 et apportera des informations supplémentaires sur cette anomalie R1-R3 du signal en phase.

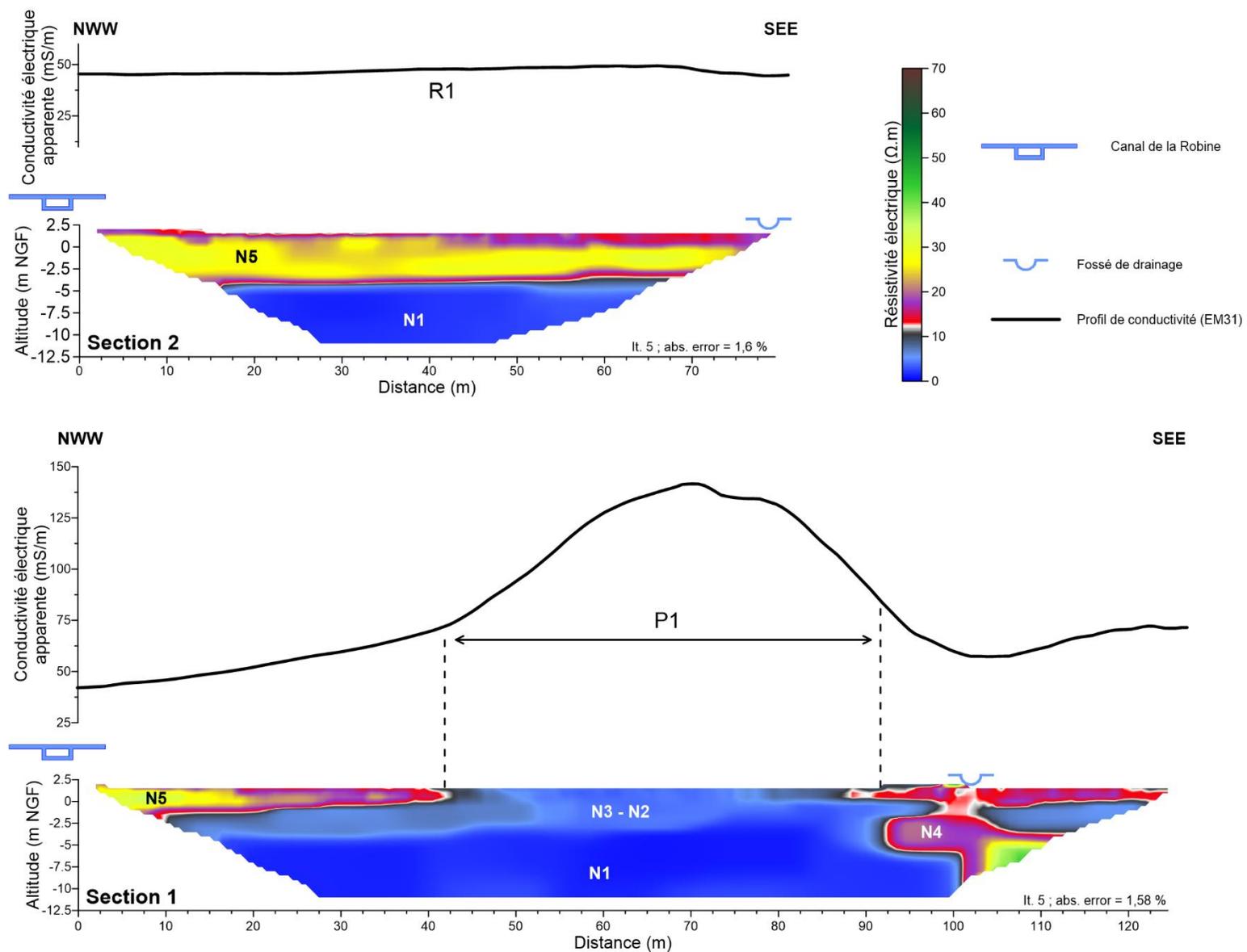


Figure 2.12 : Sections de résistivité électrique 1 et 2 réalisées dans la zone de Craboules et Craboulette.

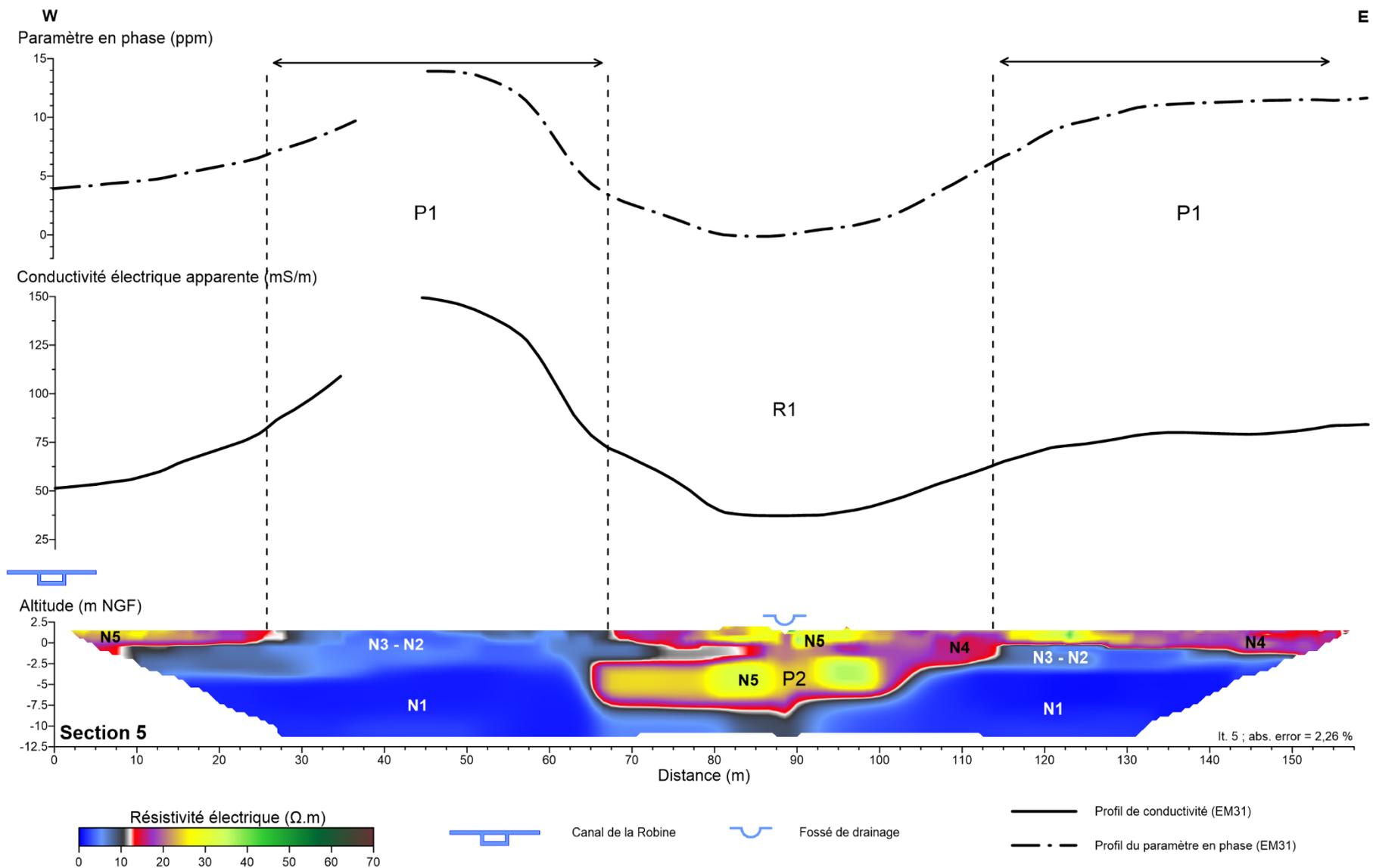


Figure 2.13 : Sections de résistivité électrique 5 réalisées dans la zone de Craboules et Craboulette.

2.1.5.3 Les sections électriques

Les sections 1, 2 et 5 sont localisées sur la rive est du Canal de la Robine (Figure 2.11a). La section 1 a été positionnée en travers de l'anomalie P1 qui est interprétée comme un probable paléo-chenal (Figure 2.12). Cette dernière est caractérisée par le milieu N3-N2. Elle possède une largeur de 45 m pour une profondeur de 4,2 m. La base de la section correspond au milieu N1, comme pour le transect de l'Étang du Cercle (Figure 2.10). Les extrémités de la section correspondent à des milieux plus résistants, caractérisés par N5 à l'ouest et N4 à l'est (Figure 2.12).

La section 2 est positionnée pour observer la continuité de l'anomalie P1. Cependant, elle est caractérisée par un milieu plus résistant et homogène correspondant à N5. Cette formation semble être associable avec l'anomalie résistante R1, identifiée sur la carte de CEa (Figure 2.11a) et qui s'étend de part et d'autre de la Robine. La section 2 (Figure 2.12), ainsi que le profil de conductivité associé, ne montrent pas la continuité de l'anomalie P1. Celle-ci ne se prolonge pas plus vers le nord.

La section 5 est en travers de P1 et recoupe la section 1 au sein de cette anomalie P1 (Figure 2.11a). Cette section est en travers de l'anomalie rectangulaire résistante (R3), au centre de P1. Elle apporte des informations sur la forme allongée visible sur la carte du paramètre en phase (Figure 2.11b). La section 5 est illustrée sur la Figure 2.13 et complétée par les profils de conductivité et de signal en phase. La partie ouest de cette section est similaire à la section 1 (Figure 2.12 et Figure 2.13). La structure P1 est caractérisée par un milieu conducteur N3-N2 présentant les mêmes dimensions que sur la section 1. La base de la section est aussi composée par le milieu N1 plus conducteur.

La section 5 étant plus longue, elle permet de mieux identifier les différents milieux composant l'anomalie P1 et la zone résistante R3. La partie est de cette section présente la suite de l'anomalie P1, visible sur les cartes de conductivité (Figure 2.11a et 2.13). Dans cette partie, P1 est composée d'une couche plus résistante en surface, correspond au milieu N4, et d'une couche plus conductrice sous-jacente de même signature électrique que P1 (dans la partie ouest ; Figure 2.13). Cependant la partie est de la section 5 n'est pas positionnée sur une zone de forte conductivité de la carte de CEa mais dans une bande plus résistante (Figure 2.11a). De ce fait, cette géométrie de l'anomalie P1 dans la partie est de la section 5 pourrait être associée à une hétérogénéité de surface très locale (Figure 2.13). Il est fort probable que les zones très conductrices de la structure P1 sur la carte de CEa présentent la même géométrie en section électrique que sur la partie ouest de la section 5 (Figure 2.11 et 2.13).

La partie centrale de cette section est localisée sur la zone résistante R3 (et sa continuité R1), identifiée sur la carte de CEa (Figure 2.11a). Cette partie présente un milieu plus résistant N5 possédant une géométrie particulière (Figure 2.13). Cette anomalie R3 est composée en deux parties résistantes : une en surface et une plus en profondeur (nommée P2). La partie superficielle est formée d'une large

lentille de 45 m de large pour une profondeur d'environ 2 m. Les bords de celle-ci sont légèrement plus conducteurs (milieu N4). La partie profonde (P2) est caractérisée par une masse résistante (milieu N5) avec une profondeur d'apparition de -2,4 m (4 m sous la surface). Elle possède une largeur d'environ 40 m pour une épaisseur de 5 m. Cette anomalie P2 se distingue bien de la partie superficielle par un niveau plus conducteur entre les deux. La morphologie de P2 semble correspondre à un paléo-chenal comblé par des matériaux moins conducteurs que le paléo-chenal P1 (probablement des alluvions sableuses). Les profils de CEa et du signal en phase sont bien associés à cette anomalie plus résistante (R3). La profondeur d'apparition de la structure P2 est de 4 m et la profondeur d'investigation de l'EM31 est comprise entre 1,5 et 5 m. Ces deux anomalies R3 et P2 sont résistantes ; il est donc normal d'obtenir une conductivité faible. Si elles correspondent bien à des alluvions sableuses, alors la faible valeur du signal en phase est cohérente avec ces deux anomalies (R3 et P2). D'après la section électrique, l'anomalie R1-R3 de forme allongée (carte du signal en phase ; Figure 2.11b) pourrait correspondre à l'anomalie plus résistante (P2), présente à 4 m sous la surface (Figure 2.13). De ce fait, l'anomalie du paléo-chenal P1 et celle de P2 pourrait correspondre à deux anomalies superposées mais à des profondeurs différentes (entre 0 et 4,5 m sous la surface pour P1 et 4 et 9 m pour P2). L'absence de l'anomalie R1-R3 sur la carte de CEa pourrait être liée à une salinité du sédiment plus élevée au niveau P1. Ceci augmenterait la conductivité au niveau du recoupement entre P1 et l'anomalie R1 et R3.

2.1.6 Conclusions

Les cartes de CEa réalisées sur la zone de Craboules et Craboulette ont permis de localiser une anomalie méandriforme très conductrice (P1, Figure 2.11). Les sections de résistivité électrique effectuée en travers de cette anomalie semblent confirmer la présence d'un paléo-chenal (P1), large de 45 m pour une profondeur de 4,2 m (Figure 2.12 et 2.13). Sur la carte de CEa, une anomalie plus résistante (R3) est présente au sein de l'anomalie P1 (Figure 2.11a). Sur la carte du signal en phase (Figure 2.11b), cette anomalie est intégrée dans une bande d'une quarantaine de mètres de large, orientée N-S, présentant un signal en phase très faible. L'origine de cette bande pose question car elle traverse l'anomalie P1 sans être observée sur la carte de conductivité (Figure 2.11a). Cette zone résistante R3 a été recoupée par la section 5, mettant en évidence deux grandes anomalies plus résistantes (environ 40 m de large), dont une présente à environ 4 m de profondeur. L'anomalie profonde (P2) semble correspondre à un ancien chenal.

La zone de Craboules et Craboulette présente donc de nombreuses structures intéressantes pour l'étude de la paléogéographie de l'ancien cours de l'Aude entre le Castérou et Narbonne. Un transect de carottages a été réalisé en parallèle de la section 1 pour vérifier la présence des paléo-chenaux P1 et P2. Ces carottes apporteront des informations sur la signature électrique des formations sédimentaires.

2.2 CAROTTAGES DANS LE SECTEUR DE CRABOULETTE, DELTA DE L'AUDE

La campagne de carottages sur la zone de Craboules et Craboulette a été réalisée sur la base des résultats des prospections géophysiques. Les analyses granulométriques et paléoenvironnementales, ainsi que l'interprétation du transect de carottes ont été effectuées par Clément Flaux. Les résultats sont présentés en Annexe 3 de ce mémoire.

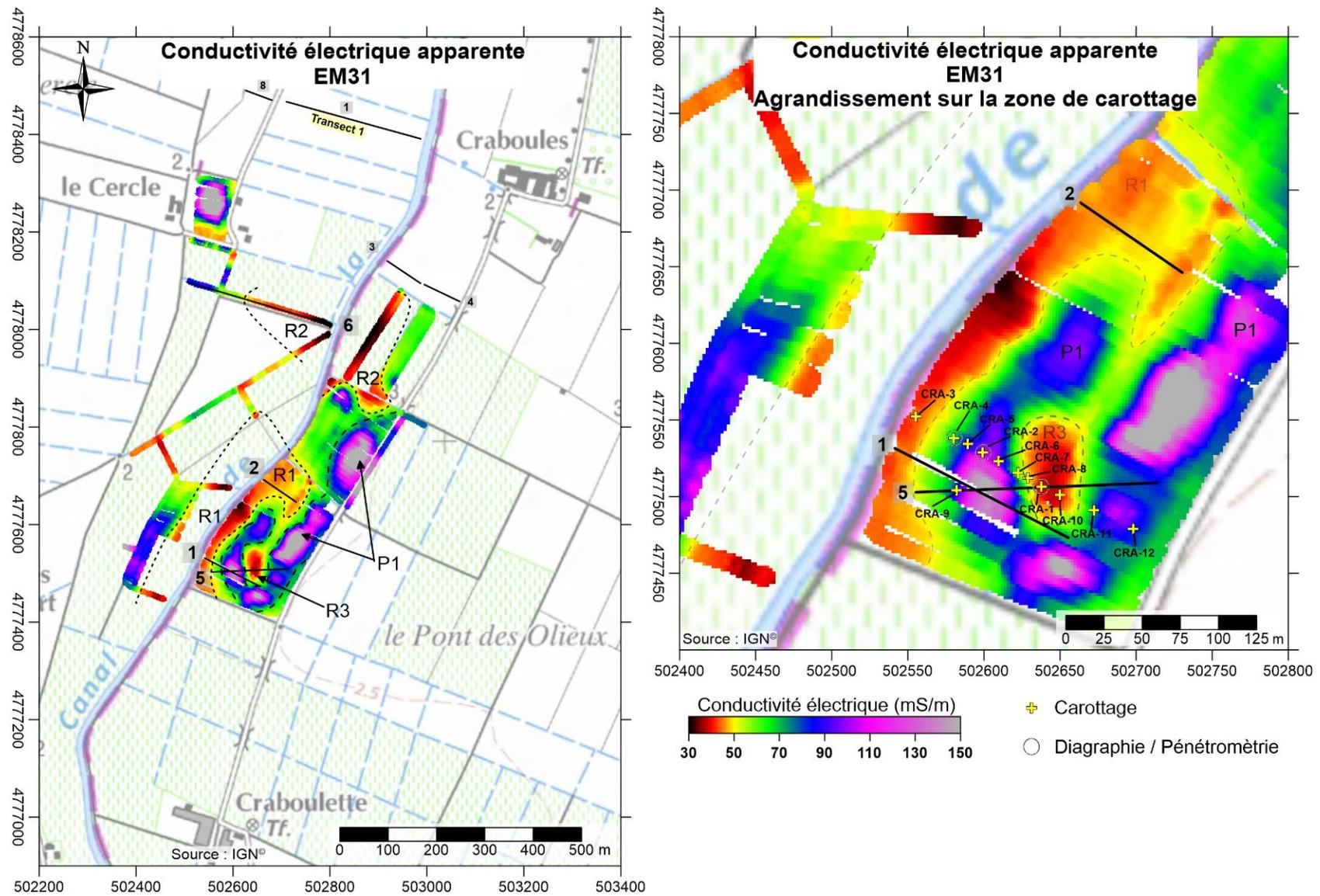
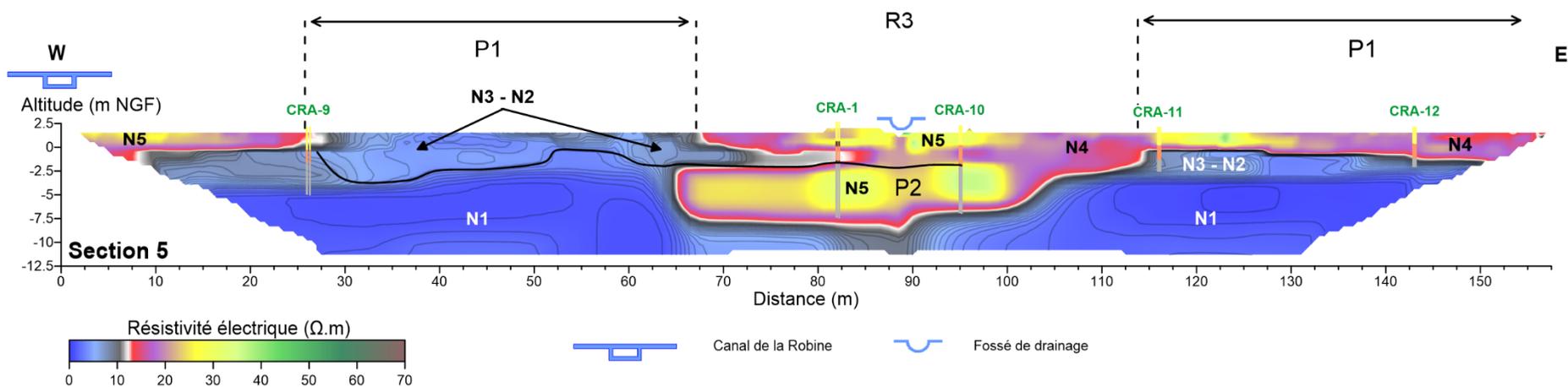
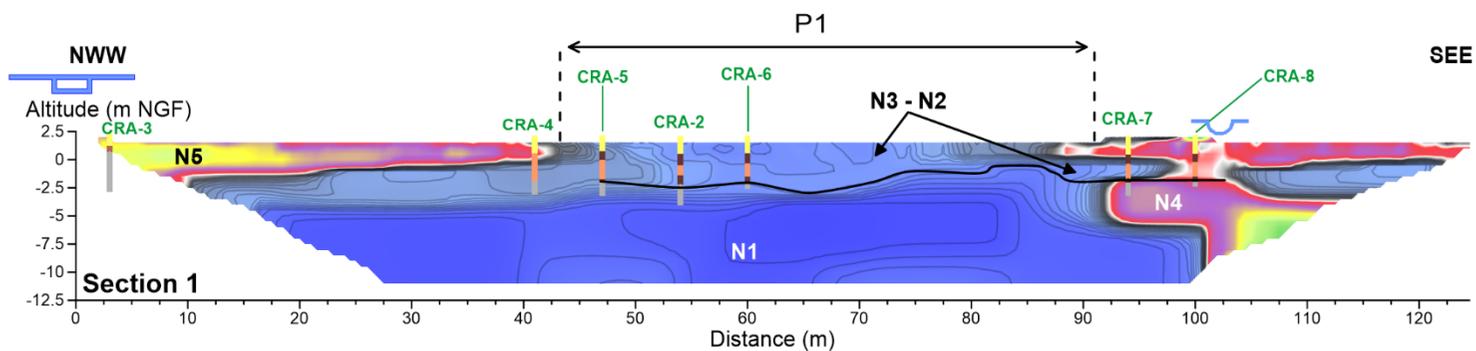


Figure 2.14 : Carte de la conductivité électrique apparente mesurée à l'EM31 de la zone de Craboules et Craboulette. Agrandissement sur le transect de carottage et localisation des carottes et des diagraphies électriques couplées à la pénétrométrie.



Interprétation simplifiée des environnements de dépôts (d'après C. Flaux) :

- Milieu lagunaire confiné ou ouvert sur la mer
- Paléo-chenaux
- Nappe d'eau stagnante (bras mort)
- Plaine d'inondation du Canal de la Robine

Figure 2.15 : Sections de résistivité électrique 1 et 5 réalisées dans la zone de Craboules et Craboulette. Elles sont superposées avec des courbes d'isovaleurs comprises entre 0 et 10 Ω.m avec un intervalle de 0,5 Ω.m.

2.3 CONFRONTATION ENTRE LA GÉOPHYSIQUE ET LES CAROTTAGES

La carte de conductivité électrique apparente (CEa) a permis de détecter une anomalie conductrice méandriforme (P1, Figure 2.14). Les sections de résistivité électrique réalisées en travers de cette structure mettent en évidence la présence probable d'un paléo-chenal d'une quarantaine de mètre de large pour 4 m de profondeur. Les informations cartographiques et stratigraphiques fournies par la géophysique ont permis de positionner le transect de carottages. La section 5 passe sur la carotte CRA-9 et recoupe le transect de carottage en CRA-1. Les différents carottages sont représentés sur les sections électriques (Figure 2.15). Pour la section 1, les carottes ne sont pas projetées orthogonalement sur la section mais en fonction des isovaleurs de la conductivité électrique (Figure 2.14). Ceci permet de tenir compte de la géométrie de la structure conductrice P1.

Les données des carottes ont permis de restituer une histoire morpho-sédimentaire de la zone de Craboules et Craboulette, dont la synthèse est illustrée sur la Figure 2.15. Différents milieux sédimentaires ont été caractérisés. Ils correspondent à des environnements lagunaires, des plaines d'inondation d'un fleuve ainsi que la présence de deux paléo-chenaux successifs. Différents faciès sont ainsi rencontrés allant des alluvions les plus fines (vases et limons) aux plus grossières (sables graveleux).

Les méthodes électromagnétiques et électriques employées pour la prospection sont sensibles aux variations de lithologie du sédiment et du sol. Les cartes de CEa et les sections de résistivité électrique présentent des contrastes qui sont influencées par ces variations. Cette confrontation des données géophysiques avec les carottes doit permettre de mieux interpréter les contrastes de la conductivité/résistivité de la subsurface.

Afin de mieux comprendre le comportement électrique des différents faciès rencontrés dans les carottes, des diagraphies de résistivité électrique couplées à de la pénétrométrie (nommées diagraphie) fournissent des informations sur les propriétés électriques et mécaniques des sédiments à une échelle centimétrique, en fonction de la profondeur. Les profils électriques seront confrontés aux sections de résistivité afin de vérifier la validité du modèle. Les pénétrogrammes traduisent les variations verticales de la résistance de pointe à l'enfoncement en fonction de la profondeur.

Ainsi, trois diagraphies ont été réalisées en parallèle des carottages CRA-1, CRA-2 et CRA-4 (Figure 2.14). Les profils de résistivité et les pénétrogrammes seront présentés et discutés avec les colonnes sédimentaires des carottes. Ces dernières seront aussi confrontées aux variations électriques modélisées par les sections de résistivité. Dans un second temps, le transect de carottes et les sections électriques seront aussi confrontés afin de comprendre ce que traduisent les contrastes de résistivité.

2.3.1 Les diagraphies de résistivité électrique et les pénétrogrammes

Les diagraphies (profils électriques et pénétrogrammes) ont été effectués en parallèle des carottes CRA-1, CRA-2 et CRA-4. Elles ont été sélectionnées en fonction des milieux sédimentaires qu'elles traversaient. Les deux premières sont caractérisées par deux formations de paléo-chenal et la dernière est à l'extérieur de celles-ci. L'ensemble des environnements de dépôts de 3 à 6 du transect de carottage est représenté par les profils de résistivité électrique et les pénétrogrammes (les environnements lagunaires 1 et 2 étaient trop profonds ; Annexe 3 : Figure 13).

La carotte CRA-2 ayant fait l'objet d'analyse granulométrique par tamisage et laser, elle servira de référence pour la comparaison entre les profils électriques et les pénétrogrammes. Les colonnes sédimentaires, les profils électriques ainsi que les pénétrogrammes des carottes CRA-2, CRA-1 et CRA-4 sont illustrés sur les Figure 2.16, 2.17 et 2.18. Chaque profil électrique est associé à un profil vertical de résistivité extrait des sections électriques 1 ou 5, permettant de les comparer.

2.3.1.1 Carotte CRA-2

La carotte CRA-2 est localisée au centre de la structure P1 (Figure 2.14 et 2.15). Elle met en évidence différents faciès sédimentaires décrits par Clément Flaux (Annexe 3 : Figure 13). La colonne sédimentaire et les analyses granulométriques associées sont représentées sur la Figure 2.16. Le profil électrique et le pénétrogramme sont illustrés en parallèle. Des horizons sont numérotés et ne correspondent pas à des horizons pédologiques mais servent uniquement à la description.

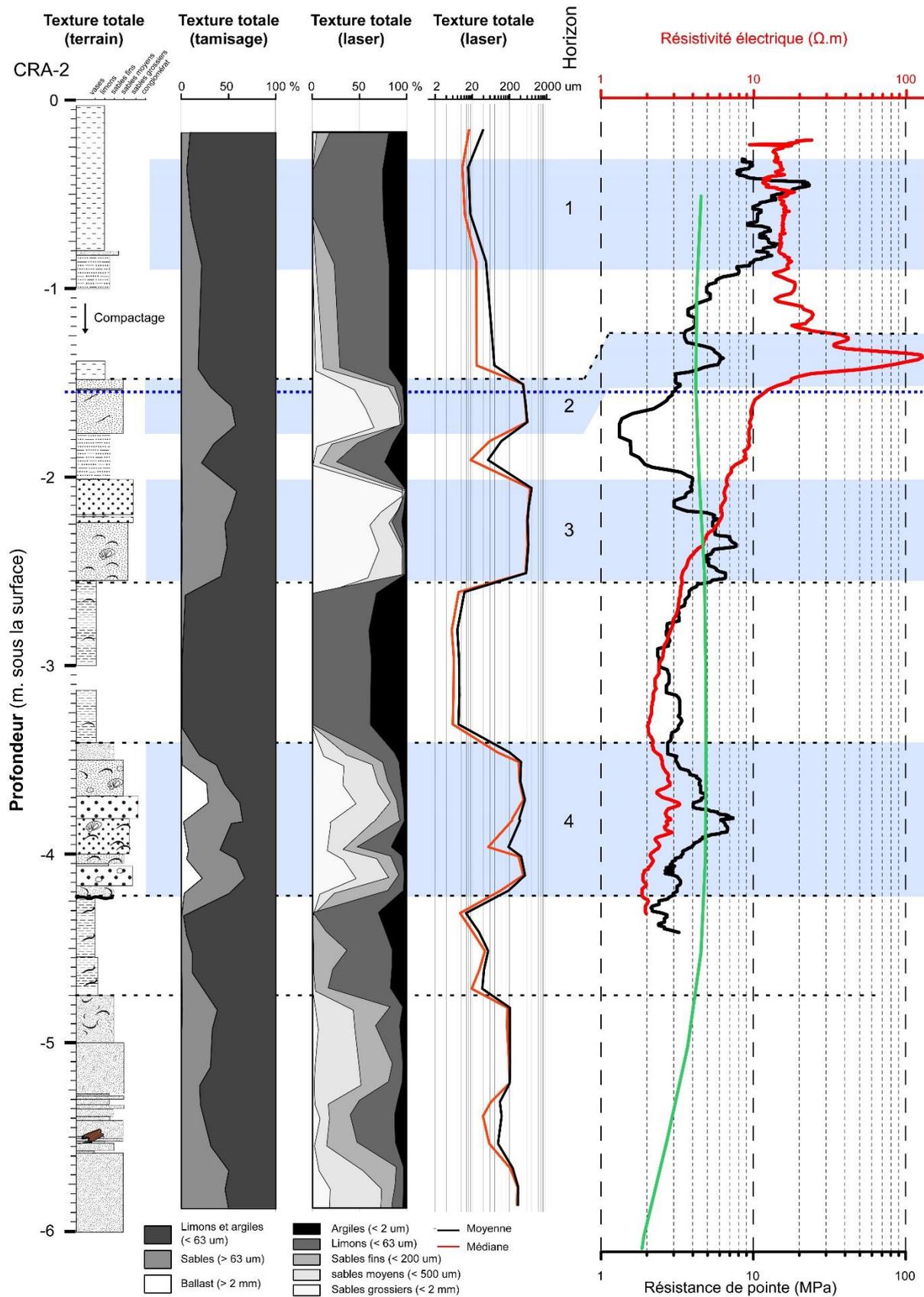
Le profil électrique présente deux parties : l'une plus résistante et une autre plus conductrice, séparées par le niveau de la nappe phréatique à -1,5 m de profondeur. La partie supérieure correspond à un milieu non-saturé en eau et se caractérise par une résistivité moyenne de 15 Ω .m (zone vadose). La partie inférieure correspond à la zone saturée en eau, avec des résistivités inférieures à 10 Ω .m. Cette variation globale est donc liée à l'état saturé ou insaturé en eau du sédiment. La partie supérieure est caractérisée par une résistance de pointe (Qd) élevée et une résistivité électrique stable au niveau de l'horizon 1. Cette variation de Qd est principalement associée au caractère très compact et très sec du sédiment limoneux. Cette zone présente en surface correspond à la tête de sol (horizon 1). Au niveau de l'horizon 2, un fort pic de la résistivité électrique (100 Ω .m) est observé et il est corrélé avec un pic de Qd. Les deux pics sont concordants et sont associés à une passée sableuse sur la colonne sédimentaire. Le sommet de cette passée est au-dessus du niveau de la nappe. Les deux pics sont liés à l'état non-saturé en eau de la passée sableuse. A l'inverse, dans la zone saturée, la passée sableuse est associée à des résistivités beaucoup plus faibles (10 Ω .m). Dans une moindre mesure, la résistance de pointe est aussi affectée par le changement de saturation en eau du sédiment. Ainsi, cette diagraphie met évidence l'influence de la teneur en eau sur la mesure de Qd et de la résistivité électrique (la résistivité est 100

fois plus faible en zone saturée qu'en zone vadose pour la même passée sableuse ; Wunderlich *et al.*, 2013).

La partie inférieure, sous le niveau de la nappe phréatique, est donc caractérisée par des résistivités plus faibles. Le profil électrique présente un gradient décroissant en fonction de la profondeur. Il peut être induit par une faible augmentation de la salinité car le profil vertical de la teneur en chlore augmente légèrement avec la profondeur (passant de 100 ppm à -2 m à 1500 ppm à -4 m, ces valeurs correspondent à de l'eau douce ; Annexe 3 : Figure 12 ; Verhegge *et al.*, 2016).

La zone entre l'horizon 2 et 3 est caractérisée par une passée plus limoneuse (Figure 2.16). Elle est marquée par une diminution de Qd. A l'inverse, le profil électrique présente une valeur stable à 10 Ω .m. Pour l'horizon 3, les sables fins et grossiers sont associés à de fortes valeurs de Qd. La courbe de résistivité est caractérisée par de légères variations avec une diminution rapide à la limite supérieure de l'horizon 3, passant de 10 à 7 Ω .m, puis une nouvelle diminution au milieu de l'horizon 3, passant de 7 à 3 Ω .m. Ces modifications très locales du gradient de résistivité sont induites par la transition entre les limons et les sables grossiers et une proportion en sables moyens plus importante (seconde partie de l'horizon 3). Cependant, la résistivité électrique possède un gradient décroissant pour une augmentation de la granulométrie. Ceci est une relation inversée (la résistivité devrait normalement augmenter) et pourrait trouver une origine dans la salinité de l'eau car la concentration en chlore augmente à partir de -2 m de profondeur (Annexe 3 : Figure 12). Les horizons 2 et 3 décrivent la formation sédimentaire du « chenal dans le delta de l'Aude » sur le transect des carottages (Faciès 5 ; Annexe 3 : Figure 13).

Entre les horizons 3 et 4, la granulométrie est homogène et associée à des limons argileux (Figure 2.16). Le pénétrogramme ne présente pas de variations importantes. Il en est de même pour la résistivité électrique. L'horizon 4 est caractérisé par des couches de sables moyens à grossiers. La résistivité de pointe présente des variations du même ordre de grandeur que pour l'horizon 3. La résistivité montre un très faible gradient croissant (augmentation de 2 à 3 Ω .m). Ce faible contraste de résistivité est tout de même significatif car cohérent avec la granulométrie. La résistivité électrique est probablement associée à la présence de ballast dans les sables. Cet horizon est lié à « l'embouchure du delta de l'Aude dans l'étang de Bages-Sigean » sur le transect (Faciès 3 ; Annexe 3 : Figure 13).



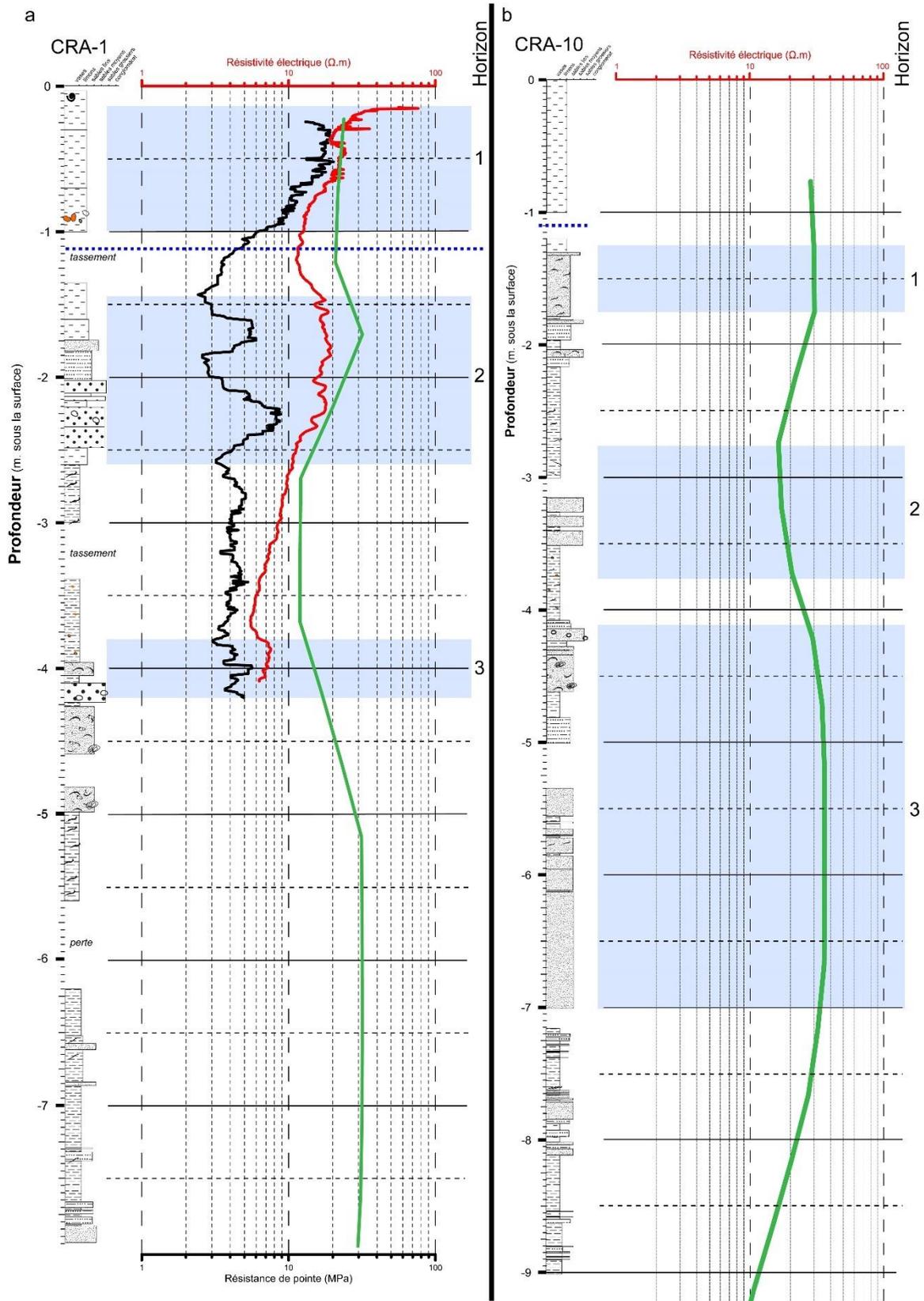


Figure 2.17 : CRA-1. (a) Colonne sédimentaire de CRA-1 (d'après C. Flux). Profil de résistivité électrique (courbe rouge) et pénétrogramme (courbe noire) réalisés en parallèle de CRA-1. Profil vertical des résistivités électriques (courbe verte) à la position de CRA-1 extrait de la section électrique 5. (b) Colonne sédimentaire de CRA-10 (d'après C. Flux) et profil vertical des résistivités électriques (courbe verte) à la position de CRA-10 extrait de la section électrique 5.

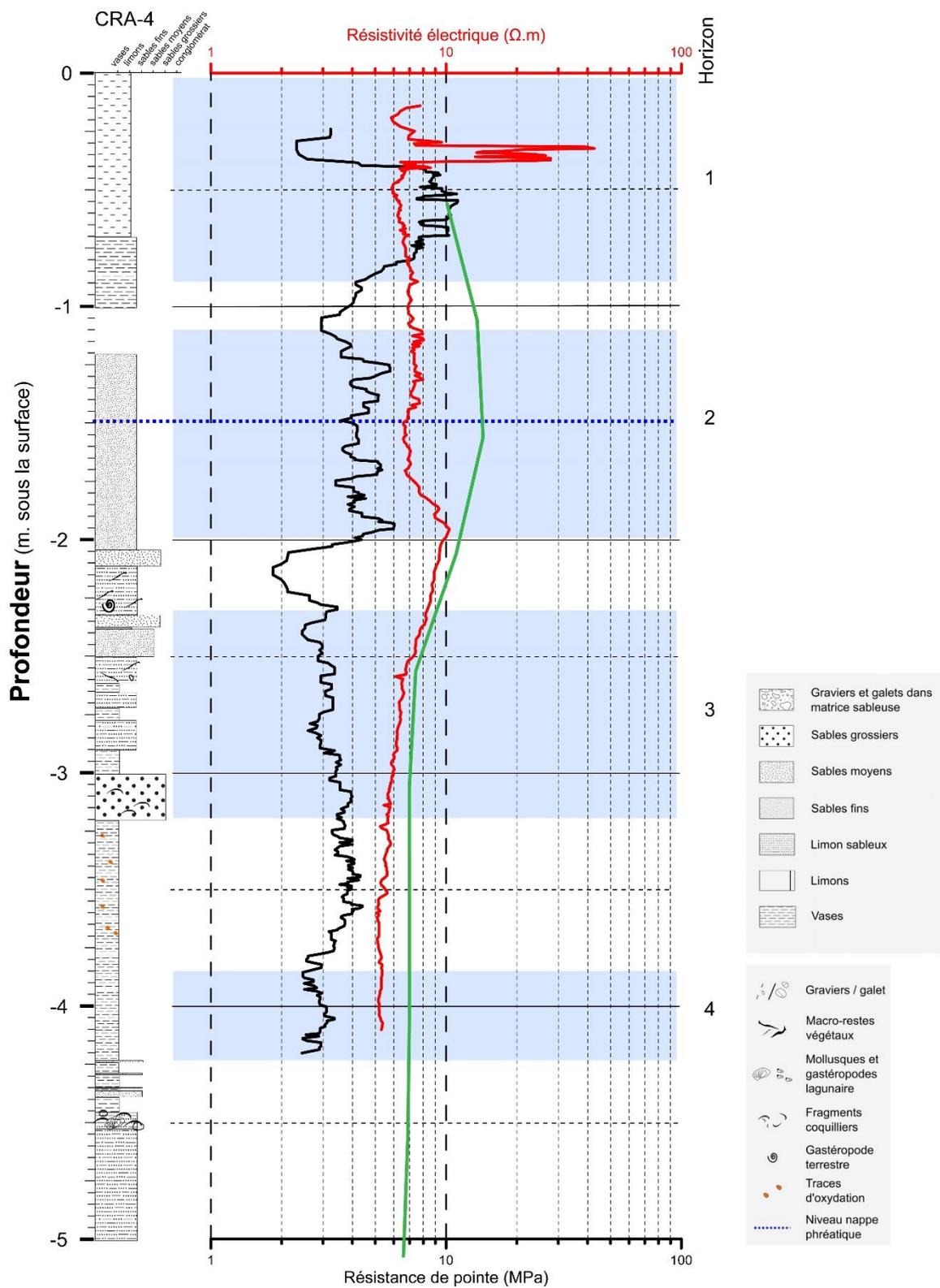


Figure 2.18 : CRA-4. Colonne sédimentaire de CRA-4 (d'après C. Flaux). Profil de la résistivité électrique (courbe rouge) et pénétrogramme (courbe noire) réalisés en parallèle de CRA-4. Profil vertical des résistivités électriques (courbe verte) à la position de CRA-4 extrait de la section électrique 1.

Le couplage entre la diagraphie électrique et la pénétrométrie fournit des informations à l'échelle centimétrique sur les dépôts sédimentaires. La résistance de pointe est un paramètre sensible à la granulométrie et à l'état de compaction du sédiment, qui dépend généralement de l'état de saturation en eau. La résistivité électrique est plus complexe car elle est sensible aux deux paramètres précédents mais aussi à la salinité de l'eau interstitielle et à la chimie du sédiment. La salinité semble ainsi générer des relations inversées entre la granulométrie et la résistivité électrique. De ce fait, le couplage entre la diagraphie électrique et la pénétrométrie permet une approche précise des contrastes de texture dans le sédiment.

Le profil vertical de la section 1 est illustré sur la Figure 2.16 par le tracé vert. Il correspond aux valeurs des résistivités localisées à la position projetée de CRA-2 sur la section 1. Les résistivités de la section sont calculées à partir de plusieurs mesures de résistivités apparentes, qui correspondent à une résistivité moyenne des composants du sous-sol dans un certain volume de sol dépendant de l'écartement inter-électrodes. De ce fait, le profil vertical des résistivités d'une section est calculé à partir d'un plus gros volume d'intégration que celui de la diagraphie. Le volume d'intégration de la section électrique est de l'ordre du mètre tandis que celui de la diagraphie est centimétrique. Ainsi, le profil de la section électrique correspond à une tendance générale de la résistivité électrique mesurée par la diagraphie électrique. La comparaison entre les deux méthodes électriques permet de vérifier la véracité du modèle des résistivités électriques présenté par la section électrique.

Le profil vertical de résistivité montre très peu de variation. Entre 0,5 et 1,5 m, la résistivité électrique de la section est d'environ 4 Ω .m. Une très légère augmentation de 1 Ω .m est localisée entre -1,5 et -4,5 m, puis la résistivité décroît jusqu'à 2 Ω .m. L'écart moyen entre les valeurs du profil vertical de résistivité extrait de la section 1 et du profil électrique (diagraphie) est l'ordre de 3 Ω .m dans la zone saturée en eau. Ceci indique que les résistivités de la section électrique ne sont pas très éloignées du profil électrique. La légère augmentation sur le profil électrique englobe les horizons 3 et 4 mais cette variation est très faible. Les formations sédimentaires sableuses correspondant aux deux paléo-chenaux ne se distinguent pas sur le profil vertical de résistivité de la section 1 mais apparaissent comme une moyenne des résistivités entre les horizons 3 et 4.

Le profil électrique extrait de la section montre des gammes de résistivité qui sont cohérentes avec le profil électrique (diagraphie). La section électrique présente les formations sableuses des paléo-chenaux comme une seule entité mais de très faibles contrastes (environ 3 Ω .m). Sans les carottages et la diagraphie, ces formations sableuses sont difficilement interprétables sur la section électrique. La complémentarité entre les méthodes à différentes résolutions est donc importante pour comprendre cette section de résistivité.

2.3.1.2 Carotte CRA-1 et CRA-10

La carotte CRA-1 est localisée sur la structure résistante R3 et à 33 m de CRA-2 (Figure 2.14). Le profil électrique et le pénétrogramme de CRA-1 sont illustrés sur Figure 2.17a. Le profil électrique de CRA-1 présente aussi un gradient décroissant qui pourrait être lié à une augmentation de la salinité avec la profondeur. Il présente des valeurs de résistivité plus élevées que le profil électrique de CRA-2 (Figure 2.16 et 2.17). Cet écart pourrait être associé à une salinité plus faible au niveau de CRA-1. Comme pour CRA-2, le profil électrique et le pénétrogramme de CRA-1 peuvent être divisés en deux parties (Figure 2.17a). La partie superficielle du pénétrogramme de CRA-1, au-dessus de la nappe phréatique (zone vadose), présente des fortes valeurs de résistivité de pointe (Qd) associées à une texture du sol compacte et sèche (Horizon 1). La résistivité électrique est aussi élevée et supérieure à 15 $\Omega.m$ dans le premier mètre.

L'horizon 2 correspond aux formations sableuses du « chenal dans le delta de l'Aude » (faciès 5 ; Annexe 3 : Figure 13). Deux pics de Qd sont observés sur le pénétrogramme, l'un est associé à une petite passée sableuse (-1,75 m), qui semble être décalée par rapport à celui-ci (probablement la cause du tassement lors du carottage ; Figure 2.17a), l'autre correspond aux sables grossiers. Ces derniers sont bien corrélés par le pénétrogramme. La résistivité électrique présente un bombement entre -1,25 et -2,5 m correspondant à une augmentation de la fraction sableuse liée à la formation du paléo-chenal. Entre l'horizon 2 et 3, le milieu sédimentaire est argileux. Le Qd ne présente pas de variation majeure. La résistivité électrique affiche un gradient décroissant probablement associé à la salinité de l'eau interstitielle.

L'horizon 3 est marqué par une augmentation de la résistivité électrique (passant de 5 à 7 $\Omega.m$) et du Qd. Cette augmentation est liée aux niveaux sableux de « l'embouchure du delta de l'Aude dans le delta de Bages-Sigean » (Faciès 3 ; Annexe 3 : Figure 13). Le Qd semble bien corrélé avec les passées sableuses mais la résistivité présente un gradient qui débute dans les niveaux argileux sus-jacents (Figure 2.17a). Soit c'est un décalage lié au tassement, soit c'est une réalité et elle est associée à des hétérogénéités dans le sédiment.

Le profil électrique et le pénétrogramme sont corrélables avec la colonne sédimentaire et ils traduisent correctement les variations de faciès rencontrées. Les résistivités électriques sont globalement plus élevées que sur CRA-2 mais elles présentent toujours le gradient décroissant pouvant être associé à la salinité de l'eau.

Le profil vertical de résistivité extrait de la section 5, associé à CRA-1, est représenté par le tracé vert sur la Figure 2.17a. Il présente des variations très proches de celles du profil électrique de CRA-1. Le bombement de la résistivité électrique est lié aux niveaux plus sableux du paléo-chenal de l'Aude (Faciès 5 ; Annexe 3 : Figure 13). Ce dernier est bien marqué sur le profil vertical de résistivité extrait de la section 5. Cependant, les valeurs du profil pourraient être surestimées. En effet, dans la zone

entre la surface du sol et -2 m, les résistivités sont supérieures de 10 Ω .m par rapport au profil électrique (diagraphie), puis entre -2 et -4 m, elles sont supérieures de 5 Ω .m. Cette surestimation pourrait être intrinsèque au modèle (la configuration du logiciel serait alors mal adaptée) ou elle serait liée à la mesure de la résistivité apparente (volume d'intégration) qui est influencée par des variations latérales de faciès (influence de la structure résistante R3 ?).

Au niveau de l'horizon 3, la résistivité du profil vertical présente une augmentation jusqu'à la fin des niveaux sableux, indiquant une bonne corrélation entre le modèle de la résistivité électrique et la colonne sédimentaire. Cependant, les derniers mètres du profil sont constants et résistants (30 Ω .m) alors que le faciès sédimentaire est argileux. Cette zone correspond à l'anomalie électrique P2 sur la section 5 (Figure 2.15).

Le profil vertical de résistivité de la section 5 de CRA-10 est aussi représenté sur la Figure 2.17b. Cette carotte est localisée à 15 m de CRA-1 et positionnée aussi au niveau de la structure résistante R3 (Figure 2.14). Comme CRA-1, CRA-10 traverse la même anomalie électrique P2 (Figure 2.17). Le profil vertical de résistivité électrique est cohérent avec la colonne sédimentaire. Les formations plus sableuses correspondent bien à des valeurs de résistivité plus élevées et inversement pour les formations plus argileuses.

L'horizon 3 du profil vertical extrait de la section 5 sur CRA-10 est associé à un milieu plus sableux et une résistivité moyenne de 35 Ω .m. Sur CRA-1, pour les mêmes profondeurs, les résistivités électriques sont dans la même gamme de valeurs mais associées à un milieu plus argileux (Figure 2.17a). Ainsi, pour deux milieux sédimentaires différents relativement proches spatialement, les résistivités électriques de la section 5 sont les mêmes. De ce fait, le profil de résistivité extrait de la section 5 sur CRA-10 semble cohérent avec la lithologie, mais pour CRA-1, dans la partie sous -5 m, la véracité du modèle est mise en doute.

2.3.1.3 Carotte CRA-4

La carotte CRA-4 est localisée à 32 et 65 m de CRA-2 et de CRA-1 et en bordure de la structure P1 (Figure 2.14). Le profil électrique et le pénétrogramme de CRA-4 est illustré sur la Figure VI.5. Le profil électrique, contrairement à celui de CRA-2 et de CRA-1, ne présente pas de gradient décroissant de la résistivité. Ce gradient est attribué à l'augmentation de la salinité de l'eau interstitielle en fonction de la profondeur. Avec ce même raisonnement, l'absence de gradient traduit une salinité de l'eau stable et plus douce (la résistivité électrique du profil électrique est plus élevée).

Les valeurs de la résistivité électrique de CRA-4 sont globalement inférieures à 10 Ω .m. Dans l'horizon 1, la tête de sol est identifiée par le pénétrogramme qui présente des résistances de pointe (Qd) élevées entre -0,5 et -0,75 m. La résistivité électrique est très stable dans cet intervalle. Cependant, de fortes valeurs de résistivité (supérieures à 20 Ω .m) sont associées à des faibles Qd au-dessus de la tête

de sol. Cette anomalie semble être une réalité car elle est enregistrée par les deux méthodes. Cependant, la colonne sédimentaire présente un milieu limoneux homogène. Cette anomalie est pour l'instant sans réponse et pourrait être un phénomène très local.

Dans l'horizon 2, le pénétrogramme présente des résistances de pointe élevées associées à des limons sableux. Cependant, le profil électrique est très stable (environ $7 \Omega.m$) malgré la lithologie limono-sableuse du sédiment. De plus, une partie de l'horizon 2 est dans la zone vadose et la résistivité ne présente pas de valeur plus élevée que pour la partie saturée. Cette absence de variation traduit un sédiment très homogène. La fin de l'horizon 2 présente une augmentation de la résistivité associée à un pic de Qd qui est associé à la petite passée plus sableuse à -2 m. Cette augmentation est suivie par une diminution des deux courbes qui est associée à une passée plus limoneuse.

L'horizon 3 présente une alternance de niveaux sédimentaires avec textures différentes. Les variations de Qd sont plutôt faibles mais corrélables avec la colonne sédimentaire. La résistivité électrique ne présente pas de variation, comme pour l'horizon 1. Après l'horizon 3, la résistance de pointe montre de petites variations dans un milieu argileux homogène. Ces variations sont probablement induites par de petites hétérogénéités. La résistivité électrique est toujours stable et ne varie pas.

Cette diagraphie électrique illustre la complexité de la mesure de la résistivité électrique qui ne varie pas forcément avec les paramètres physiques du sédiment (granulométrie et teneur en eau). L'absence de variation sur le profil électrique de CRA-4 ne démontre pas que la résistivité électrique est insensible à ces paramètres mais elle est probablement influencée par d'autres composantes du sédiment.

Le profil vertical de résistivité extrait de la section 1, associé à CRA-4, est représenté par le tracé vert sur la Figure 2.18. Dans la première partie du profil, entre la surface du sol et -2 m, les résistivités présentent des valeurs supérieures au profil électrique (valeur moyenne de $15 \Omega.m$). Elles sont surestimées de $7 \Omega.m$. Cependant elles ne sont pas incohérentes avec la colonne sédimentaire qui présente une formation sableuse. La partie inférieure du profil montre des variations très proches du profil électrique.

La divergence du profil vertical des résistivités électriques de la section 1 par rapport au profil électrique dans la partie supérieure pourrait être induite par le fait que la section 1 a été réalisée en juillet 2015 et la diagraphie en juillet 2016. Cette divergence serait alors liée à un changement des conditions du milieu sédimentaire entre les deux années. Ce changement pourrait être lié à un niveau de la nappe phréatique différent. Globalement, le profil vertical de la section 1 est cohérent avec le profil électrique.

2.3.1.4 Le transect de carottes et les sections électriques 1 et 5

La Figure 2.15 illustre les sections électriques 1 et 5 avec la localisation des carottes et un code couleur pour les différents environnements de dépôts décrits par Clément Flaux. Les deux paléo-chenaux identifiés sur les carottages de CRA-5, CRA-2, CRA-6 et CRA-7 correspondent au milieu plus

conducteur N3-N2. Les paléo-chenaux identifiés sur les carottages CRA-1, CRA-8 et CRA-10 sont associés au milieu plus résistant N4 (milieu entre les deux milieux N5 au niveau de l'anomalie R3). Un tracé hypothétique de la base du premier paléo-chenal est proposé. Il a été réalisé en suivant la limite entre les milieux N1 (dépôts de lagunes) et N3-N2 correspondant à un gradient de la résistivité (resserrement des isovalues), sauf au niveau du fossé de drainage où la résistivité du milieu augmente.

Le milieu très conducteur N1, sous -5 m d'altitude, correspond ainsi à des formations de dépôts en contexte lagunaire. Les très faibles résistivités de N1 sont probablement liées à la salinité qui présente un gradient croissant avec la profondeur.

L'anomalie électrique P2 est caractérisée par des faciès de dépôts lagunaires. Elle n'est pas associée à un paléo-chenal. Les valeurs de résistivité de cette structure sont aussi surestimées par rapport à la diagraphie électrique de CRA-1 (Figure 2.17a). Cependant, les résistivités électriques du profil électrique de CRA-1 sont aussi supérieures à celles du profil électrique de CRA-2 (Figure 2.16). De ce fait, la différence de résistivité entre le milieu plus conducteur N1 et l'anomalie résistante R3 est probablement induite par une baisse de la salinité entre ces deux structures (Figure 2.15). Il est possible que cette diminution soit induite par la présence d'un panache d'eau douce correspondant à la structure P2. Le milieu résistant N5 présent en surface correspond probablement à l'effet drainant du fossé. Ainsi, le milieu N5 présent à l'ouest et près la Robine pourrait aussi être lié à un apport d'eau douce de la Robine.

2.3.2 Conclusions et discussions

Dans la zone de Craboules et Craboulette, le couplage entre les prospections électromagnétiques et les sections de résistivité électrique a permis d'identifier une anomalie conductrice pouvant être associée à un paléo-chenal (Figure 2.14 et 2.15). La zone d'implantation du transect des carottages a ainsi été déterminée grâce à l'interaction interdisciplinaire entre géophysiciens, géomorphologues et archéologues.

L'étude sédimentologique des carottes a permis de confirmer la présence de deux paléo-chenaux successifs et de décrire les différents environnements de dépôts. Ainsi, le couplage entre la prospection électromagnétique en carte et les sections électriques est un bon outil pour l'étude paléogéographique dans ce type d'environnement.

Le couplage entre la diagraphie électrique et la pénétrométrie fournit des informations essentielles pour comprendre les variations de la résistivité électrique associées aux différents faciès sédimentaires. La pénétrométrie caractérise très bien les contrastes lithologiques décrits par les colonnes sédimentaires et les analyses granulométriques. La diagraphie électrique est sensible aussi à ces contrastes mais fournit d'autres informations notamment sur les variations de la salinité de l'eau interstitielles. Les deux approches sont donc très complémentaires.

Sur l'ensemble des profils électriques, dans la zone saturée en eau, les contrastes de résistivité sont très faibles malgré des variations lithologiques importantes. Ceci semble indiquer que les valeurs de la résistivité électrique sont influencées par la conductivité électrique de l'eau interstitielle. Les deux profils électriques de CRA-2 et CRA-1 présentent un gradient de résistivité qui pourrait être associé à l'augmentation de la concentration en chlore sur les analyses chimiques de CRA-2 (Figure 2.16, annexe). A l'inverse, le profil électrique de CRA-4 ne montre pas ce gradient (Figure 2.18). Il pourrait être envisagé que le Canal de la Robine draine de l'eau douce dans le sédiment, atténuant la salinité.

De manière générale, les profils verticaux de la résistivité des sections électriques présentent un modèle de répartition de la résistivité cohérent avec les profils électriques. Pour CRA-1 et CRA-4 (Figure 2.17 et 2.18), les profils verticaux ont des valeurs de résistivité électrique surestimées par rapport aux profils électriques. Néanmoins, les contrastes de résistivité des profils verticaux sont très cohérents avec les contrastes sur les profils. Pour CRA-2, le profil vertical représente une tendance très générale du profil électrique (valeur moyenne du profil électrique). Parmi les différents profils, celui de CRA-2 est le plus éloigné des modèles de résistivité du profil électrique. Cependant, les valeurs de résistivité du profil sont dans la gamme de résistivité du profil électrique.

La surestimation des valeurs de résistivité pourrait être intrinsèque au modèle de résistivité de la subsurface. Pour le vérifier, des sondages 1D de la résistivité pourraient être calculés afin de vérifier si le modèle 1D tend vers la réalité du profil électrique.

La vérification du modèle de résistivité par des paramètres extérieurs est donc primordiale pour bien interpréter et comprendre la répartition de la résistivité de la subsurface. Dans cette étude, la véracité du modèle est vérifiée qualitativement via la diagraphie électrique, la pénétrométrie et les carottages. Dans une étude récente, une équipe de recherche allemande a développé un protocole permettant d'intégrer les données des diagraphies électriques et des carottages dans le processus de calcul du modèle de la répartition verticale de la résistivité. L'objectif était de contraindre cette répartition vers les profils électriques et les informations des carottes (Fischer et *al.*, 2016). La prochaine étape dans le traitement des données des sections électriques serait de pratiquer ce type de protocole pour obtenir un modèle avec une fiabilité plus élevée.

La poursuite des investigations dans la zone de Craboules et Craboulette pourrait se faire par la prospection magnétique. Elle pourrait mettre en évidence des anomalies magnétiques liées à la divagation du chenal comme pour la zone de Mandirac. La méthode magnétique pourrait aussi fournir d'autres informations sur la structure de faible intensité du signal en phase orientée N-S (Figure 2.14).

CHAPITRE VI

-

Conclusions générales

-

Perspectives

L'interdisciplinarité est le mot qui a été portée tout au long de cette thèse. La recherche et la réflexion commune entre les disciplines de la géophysique, de l'archéologique et de la géomorphologie a été le moteur qui a permis les développements méthodologiques détaillés dans ces travaux de thèse. Ceux-ci ont été présentés selon deux volets principaux : un volet archéologique et un volet paléoenvironnemental. Même s'ils ont été traités séparément, ces deux volets s'articulent ensemble autour d'un même thème : l'occupation humaine d'un site archéologique.

1 DÉVELOPPEMENT MÉTHODOLOGIQUE À L'ÉCHELLE D'UN SITE ARCHÉOLOGIQUE

1.1 SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

Le chapitre IV a présenté les développements méthodologiques à l'échelle d'un site archéologique. Dans un premier temps, un protocole original de prospection magnétique à haute résolution spatiale et haute précision de positionnement, ainsi que la chaîne de traitement des données, ont été présentés. Ce protocole a été développé avec l'objectif de détecter à la fois des structures pluri-métriques et pluri-décimétriques (inférieures à une quarantaine de centimètres) à l'intérieur d'une enceinte fossoyée du Néolithique. La mise en évidence par des fouilles récentes de petites structures (trou de poteau, palissade) et d'habitats à l'intérieur des enceintes a motivé le développement de ce protocole original. Le site néolithique du Pontet à Saint-Nazaire-sur-Charente est la zone d'étude qui a été choisie pour tester et mettre en place ce protocole. Ce dernier et sa chaîne de traitement des données ont été détaillés dans un article publié dans la revue interdisciplinaire *Archaeological Prospection*.

La carte magnétique résultante est de grande qualité avec une haute résolution spatiale (30 mesures/m²) et une haute précision de positionnement (infra-décimétrique). L'intérêt d'une telle carte est la détection des structures pluri-métriques à pluri-décimétriques en amont d'une opération de fouille. Cette carte sert ainsi de base de travail pour les investigations archéologiques et géophysiques futures. Ce nouveau protocole a été testé sur un autre site néolithique : le site de la Garenne à Saint-Hippolyte. Il est dans un contexte environnemental proche mais différent du site du Pontet. Ceci a permis d'effectuer un contrôle de ce protocole de prospection magnétique sur une autre enceinte fossoyée.

Dans un second temps, une démarche méthodologique a été mise en place pour évaluer le potentiel de conservation d'un niveau d'occupation néolithique sur le site du Pontet. À partir de la carte magnétique du site, des cartes et des sections électriques ont été réalisées sur des zones particulières. Elles ont permis d'apporter des informations complémentaires à la carte magnétique, notamment sur une estimation qualitative de la profondeur d'apparition du substrat calcaire. Sur la base de ces investigations géophysiques, un sondage archéologique a été positionné sur de présumées fosses néolithiques. Le sondage a permis de mettre en évidence la présence d'un niveau d'occupation

néolithique, préservé sous quelques dizaines de centimètres de sol. Les données archéologiques, géophysiques, géotechniques et celles issues de photographies aériennes ont été utilisées pour développer une démarche méthodologique afin d'estimer l'épaisseur de sol recouvrant le substrat calcaire. Cette estimation a permis de définir un potentiel de conservation du niveau d'occupation.

1.2 PERSPECTIVES

1.2.1 Protocole original de prospection magnétique

La prospection magnétique avec le protocole original a été testée sur deux sites néolithiques dans des environnements proches mais différents. Ce protocole a montré son efficacité pour la détection de structures archéologiques pluri-décimétriques. La perspective envisagée est de tester ce protocole dans des contextes archéologiques différents, par exemple des sites présentant des murs en pierre, des fours de potier, *etc.* De plus, les prospections magnétiques réalisées avec ce nouveau protocole ont été effectuées sur des sites associés à des sols développés sur un substrat calcaire. Il serait intéressant de vérifier la qualité de la carte magnétique sur des sites archéologiques associés à un sol non-calcaire, comme un sol développé sur des roches détritiques. De plus, la multiplication des prospections magnétiques avec ce protocole permettra de l'améliorer en corrigeant les différentes sources de problème, spécifiques ou non à un site, qui pourront être rencontrées.

Les cartes magnétiques du site néolithique du Pontet et de la Garenne ont montré l'efficacité de ce protocole original pour détecter les structures archéologiques de dimensions variées. Afin de quantifier l'apport de ce protocole par rapport à un protocole standard de prospection, il sera envisagé de comparer une carte exhaustive d'un site acquise à la fois avec le protocole original et avec un protocole standard. Il serait intéressant d'effectuer la même démarche mais avec deux types de magnétomètre. En effet, les gradiomètres de type *fluxgate* sont souvent utilisés en archéologie. La comparaison entre une carte magnétique acquise avec un gradiomètre *fluxgate* et la même carte acquise avec le protocole original (utilisant un magnétomètre à vapeur de césium ou de potassium en champ total) permettra de vérifier si l'utilisation de ce protocole permet de détecter plus d'anomalies magnétiques de faible intensité qu'avec le gradiomètre. L'objectif serait de quantifier l'efficacité de l'utilisation combinée d'une station totale et d'un magnétomètre très sensible. Cette démarche est entreprise depuis octobre 2017 dans l'ANR MONUMEN avec Friedrich Lüth (DAI-Berlin).

Les gradiomètres de type *fluxgate* sont aussi utilisés sur des dispositifs de prospection magnétique tractés par un véhicule. Ce type de dispositif permet de couvrir de grande surface rapidement avec une haute résolution, comme les prospections magnétiques effectuées sur le site de Stonehenge (Gaffney et *al.*, 2012). Si l'apport de l'utilisation combinée d'une station totale et d'un magnétomètre très sensible par rapport à un protocole utilisant des gradiomètres *fluxgate* est approuvé, il pourrait être

envisagé de développer une démarche méthodologique multi-échelles et multi-résolutions. En effet, l'utilisation d'un protocole mécanisé permet de couvrir de grandes surfaces et d'acquérir une vision d'ensemble des anomalies magnétiques associées à des structures archéologiques. L'utilisation du protocole original permettrait ainsi de cartographier à plus haute précision et plus haute résolution des zones spécifiques préalablement repérées, apportant ainsi des informations complémentaires à la carte magnétique acquise à plus grande échelle.

Le protocole original, dont le positionnement des mesures est assuré par une station totale, offre une précision estimée centimétrique du positionnement. Cette précision peut être aussi atteinte par des protocoles de prospection magnétique utilisant un positionnement par GNSS (Global Navigation Satellite System) ou un GPS-RTK (Real Time Kinematic). Une comparaison entre les deux protocoles (positionnement par station totale et positionnement par GNSS ou GPS-RTK) permettra de discuter de l'apport du protocole original par rapport à un protocole par positionnement GPS, voire d'une utilisation complémentaire de ces deux protocoles.

1.2.2 Estimation du potentiel de conservation d'un niveau d'occupation

La démarche méthodologique pour l'estimation du potentiel de conservation d'un niveau d'occupation néolithique a été développée sur le site du Pontet. L'estimation de l'épaisseur a été réalisée pour un sol développé sur un substrat calcaire. Il sera intéressant de tester cette démarche dans un contexte environnemental, comme des sols développés sur des roches détritiques ou cristallines.

La démarche proposée est dépendante de la saison de prise de vue de la photographie aérienne. Cette contrainte pourrait être outre-passée par l'emploi d'un drone qui permettrait d'acquérir une orthophotographie du site avec une meilleure résolution spatiale et surtout d'effectuer le survol au meilleur moment en fonction du calendrier des cultures. De plus, les nouvelles générations de drone possèdent des caméras multi-spectrales. Ceci permettra sûrement d'améliorer la fonction de transfert entre l'imagerie aérienne et la résistivité électrique apparente.

2 PROSPECTIONS GÉOPHYSIQUES APPLIQUÉES À LA RECONSTITUTION PALÉOGÉOGRAPHIQUE

2.1 SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

Les prospections électromagnétiques et électriques ont été utilisées pour acquérir des informations en amont d'une campagne de carottages. Les prospections apportent une vision 2D horizontales et verticales des contrastes sédimentaires de la subsurface, correspondant à des anomalies de conductivité/résistivité électrique. Les résultats des prospections et des études paléoenvironnementales ont été détaillés pour les deux zones d'étude : la vallée du Grand Écours

jouxtant l'enceinte néolithique du Pontet et la plaine alluviale située au sud de Narbonne où se trouvait un vaste complexe portuaire antique. Sur ces deux zones, il a été démontré l'utilité de la prospection géophysique pour l'implantation de carottages paléoenvironnementaux.

2.1.1 Apport de la prospection géophysique : satisfaisant ?

Pour le site du Pontet, la carte de la conductivité électrique apparente et les sections de résistivité électrique ont apportées des informations sur les contrastes de conductivité/résistivité à l'échelle de la vallée du Grand Écours. Elles ont mis en évidence un comblement homogène de la vallée hormis la présence d'un probable dépôt d'abrasion accolé à la paléo-falaise, inconnu jusqu'alors. De ce fait, les prospections géophysiques ont joué un rôle important dans l'implantation des carottages. La position de chaque carotte a été choisie de manière à acquérir une information paléoenvironnementale (contenu dans les alluvions fines comblant la vallée) et à caractériser l'anomalie correspondant au dépôt d'abrasion. La confrontation entre les données géophysiques et les carottages a permis de proposer une hypothèse d'extension de ce dépôt. Ainsi, la connaissance de son extension permettra de cibler l'implantation des futurs carottages en fonction de la problématique de l'étude paléoenvironnementale qui sera traitée.

La complémentarité entre la prospection géophysique et les carottages a été forte sur le site du Pontet. En effet, les différents environnements sédimentaires (calcaire et alluvions fines) possédaient des contrastes suffisamment bien marqués pour déterminer leur géométrie. La salinité du sédiment n'a pas entraîné de biais d'interprétation majeure de ces anomalies. De plus, la superficie du site était suffisamment restreinte (50 ha) pour obtenir une vision d'ensemble des différentes composantes de la vallée (plateau, versant et comblement) par la prospection géophysique.

Pour Narbonne, la forte salinité dans la zone du Castélou a montré la difficulté d'interprétation des contrastes de résistivité dans ces environnements hyper-salins. Sans la présence de carottage en amont des sections électriques, l'interprétation des modèles aurait été très complexe. Ce problème se retrouve, dans une moindre mesure, sur les sections électriques réalisées entre les zones de Craboules/Craboulette et Narbonne. En effet, les contrastes de conductivité/résistivité sont très faibles entre les alluvions fines et les alluvions sableuses. Même si les contrastes sont faibles, les sections électriques ont montré leurs potentialités pour décrire ces contrastes, notamment au niveau de la zone de l'Étang du Cercle, où l'extension d'une partie de la plaine alluviale de l'Aude a été mise en évidence.

Les sections de résistivité électrique sur l'environnement du site du Pontet ont été réalisées selon une double configuration de quadripôle : Wenner-Schlumberger et dipôle-dipôle. Ces deux quadripôles possèdent des sensibilités différentes aux variations horizontales et verticales de la résistivité de la subsurface. La confrontation de profils extraits des sections électriques avec les diagraphies et les carottages avait permis d'observer une faible différence entre les courbes de résistivité issues du modèle Wenner-Schlumberger et de celui du dipôle-dipôle. Ceci a montré que les deux modèles sont très

proches. De ce fait, l'utilisation d'une double configuration n'est pas indispensable pour détecter les anomalies électriques de la subsurface. En effet, la configuration du dipôle-dipôle est très intéressante car l'acquisition des mesures est relativement rapide et la résolution du modèle est bonne. Ainsi, l'utilisation de la double configuration est intéressante pour des zones d'études avec très peu de données disponibles en amont (comme le Pontet). Dans le cas de Narbonne, seul le dipôle-dipôle a été utilisé car de nombreuses données géophysiques et de carottages étaient déjà disponibles. La connaissance en amont des anomalies électriques permettait de connaître la signature électrique des structures recherchées.

Ces observations montrent que la prospection géophysique est un moyen efficace et rapide pour acquérir des informations sur les anomalies associées à des contrastes sédimentaires. L'interprétation préliminaire des anomalies est pertinente pour localiser une zone d'implantation des carottages paléoenvironnementaux. La confrontation entre les résultats des carottes et les données géophysiques est obligatoire et apporte un regard critique sur les anomalies identifiées. Ceci permet de comprendre l'origine des variations mesurées et de réinterpréter, si nécessaire, ces anomalies. La démarche méthodologique utilisant la carte de conductivité apparente, la section électrique et le couplage diagraphie-pénétrrométrie est efficace et pertinente pour cibler l'implantation des carottages.

2.1.2 Apports des diagraphies électriques

Le dispositif diagraphie-pénétrrométrie est un outil efficace pour identifier les contrastes électriques et mécaniques du sédiment. Sur les deux zones d'étude, les contrastes mis en évidence étaient, dans la plupart des cas, pertinents et cohérents avec les carottages. La diagraphie a permis de faire le lien entre la résistivité électrique du sédiment et la section électrique. Ceci a permis de vérifier, ponctuellement, la validité du modèle proposé par les sections. Dans la grande majorité des cas, les sections électriques se sont montrées être robustes car les variations de résistivité étaient cohérentes avec celles observées par les diagraphies.

Dans le cadre de cette démarche méthodologique, la diagraphie est un maillon très important. En effet, elle a été utilisée en amont des carottes. Dans cette optique, la diagraphie permet d'observer les contrastes électriques à petites échelles afin de vérifier si le sédiment présente des hétérogénéités intéressantes. Elle est intervenue aussi après le carottage pour faire le lien entre le sédiment et la section électrique.

2.2 PERSPECTIVES

Cette démarche méthodologique a montré son intérêt pour localiser une zone d'implantation des carottages à partir d'une approche paléogéographique portée par des prospections électromagnétiques et électriques. Plusieurs perspectives de développements et d'amélioration peuvent être énoncées.

Le dispositif de diagraphie électrique est composé de deux électrodes rattachées au train de tige d'un pénétromètre de type PANDA® 2. Ce pénétromètre est à l'origine inadapté pour accueillir des électrodes. Dans ces travaux, le pénétrogramme est utilisé pour étudier les variations relatives de la résistance pointe et non les variations absolues. Cependant, dans des environnements plus sableux comme ceux de Narbonne, les résistances de pointe sont plus affectées par des frottements latéraux sur les parois du sondage. Ceci affecte la précision du pénétrogramme pour la détection des lamines sédimentaires. De ce fait, il faut soit corriger ces frottements latéraux en post-traitement, soit proposer un autre dispositif de diagraphie. La seconde option est privilégiée car la correction en post-traitement peut s'avérer complexe et dépendra de la texture du sédiment. Il pourrait alors être envisagé, comme perspective, une prise de contact avec la société *Sol Solution* pour leur présenter notre dispositif. Une collaboration pourrait aboutir au développement d'un outil de diagraphie intégré aux pénétromètres commercialisés.

La mesure de la résistivité électrique par diagraphie a été utilisée pour comparer les profils électriques avec des profils extraits des sections électriques. Pour améliorer les modèles de résistivité électrique, il est envisagé de réaliser plus de diagraphies en parallèle des sections électriques, notamment les plus intéressantes pour l'approche paléogéographique. Ceci permettra, en amont des carottages, d'intégrer des contraintes dans le processus d'inversion pour augmenter la robustesse des modèles de résistivité. Néanmoins, le logiciel Res2Dinv est assez limité pour les inversions *a priori* car il ne permet pas de combiner des résistivités fixées de blocs et des limites entre deux couches. Il sera alors envisagé de réaliser les inversions « normale » et *a priori* avec le logiciel libre BERT développé par Günther (2004). En effet, une étude récente de paléographie associée à un site archéologique montre l'efficacité de ce logiciel pour contraindre les inversions à partir de données de diagraphies (Fischer et *al.*, 2016).

BIBLIOGRAPHIE

- ALLEN J. R. L., 1995 – Salt-marsh growth and fluctuating sea level: implications of a simulation model for Flandrian coastal stratigraphy and peat-based sea-level curves. *Sedimentary Geology*, **100** : 21-45. doi : 0037-0738.
- AMBERT P., 1993 – Preuves géologiques de l'insularité du massif de la Clape (Aude) pendant la transgression flandrienne. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, (316) : 237-244.
- AMBERT P., 2000 – Narbonne antique et ses ports, géomorphologie et archéologie, certitudes et hypothèses. *Revue archéologique de Narbonnaise*, (33) : 295-307.
- AMBERT P., 2011 – *Potentiel et contraintes du cadre géologique régional pour l'aménagement de Narbonne antique*. in : *Espaces littoraux et zones portuaires de Narbonne et sa région dans l'Antiquité*. Lattes : UMR 5140 - CNRS, p. 291.
- APOSTOLOPOULOS G., PAVLOPOULOS K., GOIRAN J.-P. et FOUACHE E., 2014 – Was the Piraeus peninsula (Greece) a rocky island? Detection of pre-Holocene rocky relief with borehole data and resistivity tomography analysis. *Journal of Archaeological Science*, **42** : 412-421. doi : 10.1016/j.jas.2013.11.026.
- ARCHIE G., 1942 – *The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics*. Houston, Texas, p. 54-62.
- ARD V., 2012 – *Occupation, architecture et fonction d'une enceinte fossoyée du Néolithique récent - Apport des fouilles récentes du sites de Bellevue à Chenommet*. in : *Enceintes néolithiques de l'Ouest de la France de la Seine à la Gironde*. Historial de la Vendée, Les Lucs-sur-Boulogne : Association des Publications Chauvinoises - A.P.C., p. 131-147.
- ARD V., DUFRAISSE A., FOUÉRE P., FRÉMONDEAU D., LIARD M., MAINGAUD A. et MAITAY C., 2009 – Enfin des traces d'habitat à l'intérieur d'une enceinte du Néolithique récent du Centre-Ouest de la France : premiers résultats et perspectives des fouilles du site de Bellevue (Chenommet, Charente). *Bulletin de la Société préhistorique française*, **106** (3) : 597-601. doi : 10.3406/bspf.2009.13883.
- ARD V., MATHÉ V., LÉVÊQUE F. et CAMUS A., 2015 – A Comprehensive Magnetic Survey of a Neolithic Causewayed Enclosure in West-central France for the Interpretation of Archaeological Features: Comprehensive Magnetic Survey of a Neolithic Causewayed Enclosure. *Archaeological Prospection*, **22** (1) : 21-32. doi : 10.1002/arp.1495.
- Ard, V., 2014 – *Produire et échanger au Néolithique - traditions céramiques entre Loire et Gironde au IVe millénaire avant J.-C.* Editions du Comité des travaux historiques et scientifiques. Paris, France.
- ARD V. et WELLER O., 2014 – *Des enceintes qui ne manquent pas de sel. Les vases de « type Champ-Durand » comme témoins d'une activité spécifique aux pourtours des marais poitevin et charentais*. in : *actes du colloque CrabeNéo*. Les Lucs-sur-Boulogne, 19-21 septembre 2012, p. 371-385.
- ASFAHANI J., 2011 – Basalt characterization by means of nuclear and electrical well logging techniques. Case study from Southern Syria. *Applied Radiation and Isotopes*, **69** (3) : 641-647. doi : 10.1016/j.apradiso.2010.12.008.
- ASFAHANI J., 2014 – Statistical factor analysis technique for characterizing basalt through interpreting nuclear and electrical well logging data (case study from Southern Syria). *Applied Radiation and Isotopes*, **84** : 33-39. doi : 10.1016/j.apradiso.2013.09.019.

- ASPINALL A., GAFFNEY C. et SCHMIDT A., 2008 – *Magnetometry for archaeologists*. Lanham : AltaMira Press, 208 p.
- BAETEMAN C., 1991 – Chronology of coastal plain development during the Holocene in West Belgium. *Quaternaire*, **2** (3) : 116-125. doi : 10.3406/quate.1991.1960.
- BARANOV V, NAUDY H. 1964 – Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. *Geophysics* 29 (1): 67–79.
- BARKER R. D., 1989 – Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics*, **54** (8) : 1031–1037.
- BATES C. R. et BATES M. R., 2016 – Palaeogeographic Reconstruction in the Transition Zone: The Role of Geophysical Forward Modelling in Ground Investigation Surveys: Palaeogeographic Reconstruction in the Transition Zone. *Archaeological Prospection*, **23** (4) : 311-323. doi : 10.1002/arp.1546.
- BEAMISH D., 2011 – Low induction number, ground conductivity meters: A correction procedure in the absence of magnetic effects. *Journal of Applied Geophysics*, **75** (2) : 244-253. doi : 10.1016/j.japgeo.2011.07.005.
- Becker H., 2001 – Duo- and quadro-sensor configuration for high speed/high resolution magnetic prospecting with caesium magnetometer. In : *Magnetic prospecting in archaeological sites*, ICOMOS : Paris, France; 20–25.
- BECKER H. et FASSBINDER J. W. E., 2001 – *Magnetic prospecting in archaeological sites*. Paris, France : ICOMOS, 107 p.
- BENZ-NAVARRETE M.-A., 2009 – *Mesures dynamiques lors du battage du pénétrömètre PANDA 2*. Clermont-Ferrand : Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 229 p.
- BERGE M. A. et DRAHOR M. G., 2011 – Electrical Resistivity Tomography Investigations of Multilayered Archaeological Settlements: Part II - A Case from Old Smyrna Höyük, Turkey: ERT Investigations of Multilayered Settlements at Old Smyrna. *Archaeological Prospection*, **18** (4) : 291-302. doi : 10.1002/arp.423.
- BERNARD M. et DUDOIGNON P., 2007 – *Corrélation profils de résistance à la pointe–profils de teneur en eau dans les sols argileux : Marais de Rochefort*. Bordeaux, p. 1-8.
- BERNARD M., 2006 – *Étude des comportements des sols de marais : évolution minéralogique, structurale et hydromécanique. (Marais de Rochefort et Marais Poitevin)*. Poitiers, France : Université de Poitiers.
- BERNARD-UBERTOSI M., DUDOIGNON P. et PONS Y., 2009 – Characterization of structural profiles in clay-rich marsh soils by cone resistance and resistivity measurements. *Soil Science Society of America Journal*, **73** (1) : 46-54. doi : 10.2136/sssaj2007.0347.
- BESSON A., COUSIN I., DORIGNY A., DABAS M. et KING D., 2008 – The temperature correction for the electrical resistivity measurements in undisturbed soil samples: analysis of the existing conversion models and proposal of a new model. *Soil Science*, **173** (10) : 707-720. doi : 10.1097/SS.0b013e318189397f.
- BLAKELY R. J., 1995 – *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge, New York : Cambridge University Press.

- Böniger U, Tronicke J., 2010 – Integrated data analysis at an archaeological site: A case study using 3D GPR, magnetic, and high-resolution topographic data. *Geophysics* **75** (4) : 169–176. doi : 10.1190/1.3460432
- BOURGUEIL B., 2005 – Evolution de la transgression flandrienne et du littoral charentais depuis 8500 BP. *Géologie de la France*, **1** : 75–84.
- BOURGUEIL B., MOREAU P., GABET C., L'HOMER A. et VOUVE J., 1972 – Carte géologique de la France à 1/50 000, feuille Rochefort XIV-30 et Notice explicative (658).
- BREYSSE D., NIANDOU H., RODIER X., GALINIÉ H. et LAURENT A., 2002 – Le pénétromètre et l'hétérogénéité des sols archéologiques urbains. *Revue Française de Géotechnique*, **100** (3) : 43-58.
- BRUNIAUX G, LÉVÊQUE F, MATHÉ V, CAMUS A, ROMÉY C, ARD V., 2015 – *High spatial resolution magnetic survey on the Neolithic site of Le Pontet (Charente-Maritime, France): presentation of the method and associated processing*. In : *Proceedings of the 1st international conference on metrology for archaeology*, Benevento, Italie, 22-23 octobre 2015, p. 550–555.
- BRUS D. J., KNOTTERS M., VAN DOOREMOLEN W. A., VAN KERNEBEEK P. et VAN SEETERS R. J. M., 1992 – The use of electromagnetic measurements of apparent soil electrical conductivity to predict the boulder clay depth. *Geoderma*, **55** (1-2) : 79–93.
- BURENS A., GRUSSENMEYER P., CAROZZA L., LÉVÊQUE F., GUILLEMIN S. et MATHÉ V., 2014 – Benefits of an accurate 3D documentation in understanding the status of the Bronze Age heritage cave « Les Fraux » (France). *International Journal of Heritage in the Digital Era*, **3** (1) : 179–195.
- BURGAUD P., 1937 – Un fond de cabane néolithique à la Garenne (Charente-Inférieure). *Bulletin de la Société préhistorique française*, **34** (2) : 132-140. doi : 10.3406/bspf.1937.4521.
- BURNEZ C. et HESSE A., 1967 – Prospections géophysiques sur les sites archéologiques de la Charente. *Bulletin de la Société préhistorique française*, **64** (2) : 299-304. doi : 10.3406/bspf.1967.4116.
- BURNEZ C. et LOUBOUTIN C., 1999 – Les enceintes fossoyées néolithiques : architecture et fonction : l'exemple du Bassin inférieur et moyen de la Charente. *Bulletin de la Société préhistorique française*, **96** (3) : 329-352. doi : 10.3406/bspf.1999.10974.
- BURNEZ C., LOUBOUTIN C. et BRAGUIER S., 2001 – *Les habitats néolithiques ceinturés du Centre-Ouest de la France*. in : *Communautés villageoises du Proche-Orient à l'Atlantique (8000-2000 avant notre ère)*. Paris, France : Errance, p. 205-220.
- CALLEC Y., JANJOU D., BAUDIN T., LUQUET C., PELLÉ J.-M. et LAVILLE P., 2006 – Echelle des temps géologiques : charte BRGM établie dans le cadre des projets CANEV et MD GEOL.
- CALLEGARY J. B., FERRÉ T. P. A. et GROOM R. W., 2007 – Vertical Spatial Sensitivity and Exploration Depth of Low-Induction-Number Electromagnetic-Induction Instruments. *Vadose Zone Journal*, **6** (1) : 158. doi : 10.2136/vzj2006.0120.
- CAMUS A., 2008 – *Apports de l'imagerie géophysique et de la photographie satellitaire et aérienne à l'étude de l'évolution géomorphologique des marais littoraux au cours de l'Holocène : application aux marais charentais*. France : Université de La Rochelle, 386 p.
- CAMUS A., MATHÉ V., AUGEREAU B., KERNÉIS E., LÉVÊQUE F. et POUGET F., 2011 – Intégration de la géophysique et de la télédétection pour la cartographie des sols à haute résolution spatiale :

- exemple de la reconnaissance de paléochenaux historiques dans les marais charentais. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, (193) : 12-26.
- CANNON M. E., LACHAPELLE G. et MCKENZIE R. C., 1994 – Soil salinity mapping with electromagnetic induction and satellite-based navigation methods. *Canadian Journal of Soil Science*, **74** (3) : 335–343.
- CARBONEL P., DARTEVELLE H., EVIN J., GRUET Y., LAPORTE L., MARAMBAT L., TASTET J.-P., VELLA C. et WEBER O., 1998 – *Evolution paléogéographique de l'estuaire de la Charente au cours de l'Holocène*. in : *L'estuaire de la Charente de la Protohistoire au Moyen-Âge*. Paris, France : Documents d'archéologie française, p. 15-25.
- CAVERO J., 2011 – *Narbonne : historiographie et topographie des découvertes archéologiques relatives aux systèmes portuaires*. in : *Espaces littoraux et zones portuaires de Narbonne et sa région dans l'Antiquité*. Lattes : UMR 5140 - CNRS, p. 291.
- CHAPELLIER D., 2000 – *Prospection géophysique de surface : cours de géophysique - Résistivités électriques*.
- CHOO H. et BURNS S. E., 2014 – Review of Archie's equation through theoretical derivation and experimental study on uncoated and hematite coated soils. *Journal of Applied Geophysics*, (105) : 225-234.
- CHOUTEAU M. et GIROUX B., 2008 – *Géophysique appliquée II - Méthodes électromagnétiques - Notes de cours*.
- CHRISTY C. D., CHRISTY T. M. et WITTING V., 1994 – A percussion probing tool for the direct sensing of soil conductivity. Salina, Kansas : Geoprobe Systems.
- Ciminale M, Loddo M., 2001 – Aspects of magnetic data processing. *Archaeological Prospection* **8** (4) : 239–246. doi : 10.1002/arp.172
- CLARK A., 2000 – *Seeing beneath the soil: prospecting methods in archaeology*. New edition (1990)., London, Great Britain : Routledge : Taylor et Francis Group, 192 p.
- CORWIN D. L. et LESCH S. M., 2005 – Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, **46** (1-3) : 11-43. doi : 10.1016/j.compag.2004.10.005.
- COSENZA P., MARMET E., REJIBA F., JUN CUI Y., TABBAGH A. et CHARLERY Y., 2006 – Correlations between geotechnical and electrical data: A case study at Garchy in France. *Journal of Applied Geophysics*, **60** (3-4) : 165-178. doi : 10.1016/j.jappgeo.2006.02.003.
- DABAS M., DELETANG H., FERDIÈRE A., JUNG C. et HAILO ZIMMERMANN W., 2006 – *La prospection*. Errance., Paris, France, 248 p.
- DAHLIN T. et ZHOU B., 2004 – A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, **52** (5) : 379–398.
- DAHLIN T., 2000 – Short note on electrode charge-up effects in DC resistivity data acquisition using multi-electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, **48** (1) : 181–187.
- DAIRE M.-Y., 2003 – *Le sel des Gaulois*. Errance., Paris, France, 152 p.
- DELEFORTRIE S., SAEY T., VAN DE VIJVER E., DE SMEDT P., MISSIAEN T., DEMERRE I. et VAN MEIRVENNE M., 2014 – Frequency domain electromagnetic induction survey in the intertidal

- zone: Limitations of low-induction-number and depth of exploration. *Journal of Applied Geophysics*, **100** : 14-22. doi : 10.1016/j.jappgeo.2013.10.005.
- DENIS A., CREMOUX F. et BREYSSE D., 1997 – Apport d’une approche géostatique dans l’interprétation des mesures de diagraphies différées. *Revue de l’Institut Français du Pétrole*, **52** (4) : 389–406.
- DEWOLF, Y., BOURRIÉ, G., 2008 – *Les formations superficielles. Genèse - Typologie - Classification - Paysages et environnements - Ressources et risques*. Ellipses, Paris.
- DONEUS M., EDER-HINTERLEITNER A. et NEUBAUER W., 2001 – *Archaeological prospection in Austria*. in : *Archaeological Prospection*. Vienne : Michael Doneus, Alois Eder-Hinterleitner, Wolfgang Neubauer, p. 11-59.
- DU TRÉMOLET DE LACHEISSERIE E., CYROT M., DÉCORPS M., DIENY B., GEOFFROY O., GIGNOUX D., LACROIX C., LAFOREST J., LETHUILLIER P., MOLHO P., PEUZIN J.-C., PIERRE J., PORTESEIL J.-P., ROCHETTE P., ROSSIGNOL M.-F., SCHLENKER M., SEGEBARTH C., SOUCHE Y., YONNET J.-P., 1999 – *Magnétisme – Fondements*, vol. 1 (2 vol.). Grenoble : Presses universitaires de Grenoble, coll. Grenoble Sciences (21).
- DUBOIS J., DIAMENT M. et COGNÉ J.-P., 2011 – *Géophysique. Cours et exercices corrigés*. 4e édition., Paris, France : Dunod, 256 p.
- EDER-HINTERLEITNER A., NEUBAUER W. et MELICHAR P., 1996 – Restoring Magnetic Anomalies. *Archaeological Prospection*, **3** : 185-197.
- EDWARDS L. S., 1977 – A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, (42) : 1020-1036.
- FAÏSSE C., MATHÉ V., BRUNIAUX G., LABUSSIÈRE J., CAVERO J., JÉZÉGOU M.-P., LEFEBVRE D. et SANCHEZ C., 2017 – Palaeoenvironmental and archaeological records for the reconstruction of the ancient landscape of the Roman harbour of Narbonne (Aude, France). *Quaternary International* : 1-16.
- FALGUÉRA F., FALGUÉRA J.-M., GUY M. et MARSAL A., 2000 – Narbonne : cadre naturel et ports à l’époque romaine. *Méditerranée*, (94) : 15-24.
- FARGIER Y., 2011 – *Développement de l’imagerie de résistivité électrique pour la reconnaissance et la surveillance des ouvrages hydrauliques en terre*. Nantes : Ecole Centrale de Nantes, 274 p.
- FASSBINDER J. W. E. et STANJEK H., 1993 – Occurrence of bacterial magnetite in soils from archaeological sites. *Archaeologia Polona*, **31** : 117-128.
- FASSBINDER J. W. E., STANJEK H. et HOJATOLLAH V., 1990 – Occurrence of magnetic bacteria in soil. *Nature*, **343** : 161-162.
- FISCHER P., WUNDERLICH T., RABEL W., VÖTT A., WILLERSHÄUSER T., BAIKA K., RIGAKOU D. et METALLINO G., 2016 – Combined Electrical Resistivity Tomography (ERT), Direct-Push Electrical Conductivity (DP-EC) Logging and Coring - A New Methodological Approach in Geoarchaeological Research: Combining ERT, DP-EC Logs and Coring as New Approach in Geoarchaeology. *Archaeological Prospection*, **23** (3) : 213-228. doi : 10.1002/arp.1542.
- FITCH A. A., 1982 – *Developments in Geophysical Exploration Methods*. Essex, England : Applied Science Publishers, 317 p.. doi : 10.1007/978-94-009-7349-7.

- FRIEDMAN S. P., 2005 – Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, **46** (1-3) : 45-70. doi : 10.1016/j.compag.2004.11.001.
- FUKUE M., MINATO T., MATSUMOTO M., HORIBE H. et TAYA N., 2001 – Use of a resistivity cone for detecting contaminated soil layers. *Engineering Geology*, (60) : 361-369.
- FURCHE M. et WELLER A., 2002 – Sensitivity distributions of different borehole electrode configurations considering a model with a cylindrical coaxial boundary. *Geophysical Journal International*, **149** (2) : 338–348.
- GABET et MASSAUD J., 1965 – Le gisement Peu-Richardien de La Garenne 2, commune de Saint-Hippolyte (Char.-Mar.). *Bulletin de la Société préhistorique française*, **62** (1) : 159-196. doi : 10.3406/bspf.1965.4021.
- GAFFNEY C, GAFFNEY V, CUTTLER R, YORSTON R., 2008 – Initial results using GPS navigation with the Foerster magnetometer system at the World Heritage site of Cyrene, Libya. *Archaeological Prospection* **15** (2) : 151–156. doi : 10.1002/arp.330
- GAFFNEY C. et GATER J., 2010 – *Revealing the buried past - Geophysics for archaeologists*. The History Press., Great Britain, 192 p.
- GAFFNEY C., GAFFNEY V., NEUBAUER W., BALDWIN E., CHAPMAN H., GARWOOD P., MOULDEN H., SPARROW T., BATES R., LÖCKER K., HINTERLEITNER A., TRINKS I., NAU E., ZITZ T., FLOERY S., VERHOEVEN G. et DONEUS M., 2012 – The Stonehenge Hidden Landscapes Project. *Archaeological Prospection*, **19** (2) : 147-155. doi : 10.1002/arp.1422.
- GALINIÉ H., LAURENT A., RODIER X., BREYSSE D., HALILOU NIANDOU L. et BREUL P., 2003 – Utilisation du pénétromètre dynamique de type Panda en milieu urbain pour l'évaluation et la caractérisation du dépôt archéologique. *Revue d'Archéométrie*, **27** (1) : 15-26. doi : 10.3406/arsci.2003.1037.
- GALLO D, CIMINALE M, BECKER H, MASINI N., 2009 – Remote sensing techniques for reconstructing a vast Neolithic settlement in Southern Italy. *Journal of Archaeological Science* **36** (3-4) : 43–50. doi : 10.1016/j.jas.2008.07.002
- GAVAZZI B., 2015 – *Méthode magnétique multi-échelle à 3D appliquée à l'étude archéologique du site de Qasr 'Allam, oasis de Bahariya, Egypte*. Strasbourg : Université de Strasbourg, 230 p.
- GHESEQUIÈRE E., GIAZZON D., MARCIGNY C., BARBIER-PAIN D. et HULIN G., 2011 – L'enceinte Néolithique moyen de Goulet « Le Mont » (Orne) dans son contexte environnemental. *Revue archéologique de Picardie. Numéro spécial*, **28** (1) : 183-205. doi : 10.3406/pica.2011.3330.
- GIBSON A., 2017 – Excavation of a Neolithic House at Yarnbury, near Grassington, North Yorkshire. *Proceedings of the Prehistoric Society* : 1-24. doi : 10.1017/ppr.2016.15.
- GLASER B. et BIRK J. J., 2012 – State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Indio). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **82** : 39-51. doi : 10.1016/j.gca.2010.11.029.
- GOBAT J.-M., ARAGNO M. et MATTHEY W., 2003 – *Le sol vivant. Bases de pédologie - Biologie des sols*. Deuxième édition, revue et argumentée., Lausanne, France : Presses polytechniques et universitaires romandes.
- GOSLIN J., VAN VLIET-LANOË B., STÉPHAN P., DELACOURT C., FERNANE A., GANDOUIN E., HÉNAFF A., PENAUD A. et SUANEZ S., 2013 – Holocene relative sea-level changes in western Brittany

- (France) between 7600 and 4000 cal. BP: Reconstitution from basal-peat deposits. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, **19** (4) : 425-444.
- GOURRY J.-C., VERMEERSCH F., GARCIN M. et GIOT D., 2003 – Contribution of geophysics to the study of alluvial deposits: a case study in the Val d'Avaray area of the River Loire, France. *Journal of Applied Geophysics*, **54** (1-2) : 35-49. doi : 10.1016/j.jappgeo.2003.07.002.
- GRUSSENMEYER P., BURENS A., CAROZZA L., LÉVÊQUE F., GUILLEMIN S. et MATHÉ V., 2014 – Numérisation 3D de la grotte ornée des Fraux (Dordogne) : apport à l'archéologie et à la cartographie du champ magnétique. *Revue XYZ*, **1** (138) : 33-41.
- GÜNTHER T., 2004 – *Inversion methods and resolution analysis for the 2D/3D reconstruction of resistivity structures from DC measurements*. Freiberg, Germany : Technischen Universität Bergakademie Freiberg, 160 p.
- HAAS A. G. et VIALIX J. R., 1976 – Krigeage applied to geophysics. The answer to the problem of estimates and contouring. *Geophysical Prospecting*, **24** (1) : 49–69.
- HAMON T. et HULIN G., 2011 – *Les batiments du Néolithique final des vaux à Moulins-sur-Céphons (Indre) et les apports de la prospection géophysique*. in : *Le Néolithique de la France dans son contexte européen : habitat et économie aux 4e et 3e millénaires avant notre ère*. Villeneuve d'Ascq, p. 437-449.
- HANGOÛËT, J.-F., CANTOU, J.-P., PAUSADER, M., 2014 – L'orthomosaïque à échelle départementale : les performances de l'imagerie Pléiades comparées au produit BD ORTHO®. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, (208) : 19–25.
- HAO H., QIANG L., JUN W., JIANJIE C. et XIANG Y., 2012 – *Kriging-based study on the visualization of magnetic method data*. in : *International Conference on Image Analysis and Signal Processing (IASP)*. IEEE, p. 1–6. doi : 10.1109/IASP.2012.6425060.
- HASEK V. et KOVARNIK J., 1999 – Aerial and Geophysical Prospection in Archaeological Research of Prehistoric Circular Ditches in Moravia. *Archaeological Prospection*, **6** : 187-209.
- HAYLEY K., BENTLEY L. R., GHARIBI M. et NIGHTINGALE M., 2007 – Low temperature dependence of electrical resistivity: Implications for near surface geophysical monitoring. *Geophysical Research Letters*, **34** (18). doi : 10.1029/2007GL031124.
- HÉNAFF, X., OLIVET, Y., 2009 – *Sondages sur le site peu-richardien de la Prise de l'Atelier à la Tremblade (Charente-Maritime)*. in : *L. Laporte (dir.), Des premiers paysans aux premiers métallurgistes sur la façade atlantique de la France (3500-2000 av. J.-C.)*. Association des Publications Chauvinoises - A.P.C., Chauvigny, p. 105–110.
- HENDERSON R. G. et ZIETZ I., 1949 – The upward continuation of anomalies in total magnetic intensity fields. *Geophysics*, **14** (4) : 517–534.
- HESSE A., 2005 – Petite histoire de la prospection géophysique archéologique. *Archéologie et sciences des origines*, **11** (308) : 4-10.
- HINSCHBERGER F., FOURMONT A., MACAIRE J.-J., BREHERET J.-G., GUÉRIN R. et BAKYONO J.-P., 2006 – Contribution of geophysical surveys to the study of fine grained lacustrine sediments. Application to the Sarliève marsh (Massif Central, France). *Bulletin de la Société géologique de France*, **177** (6) : 311-322.

- HULIN G., BROES F. et FECHNER K., 2012 – Caractérisation de phénomènes anthropiques par la mesure de paramètres magnétiques sur surface décapée : Premiers résultats sur le projet Canal Seine-Nord Europe. *ArchéoSciences*, (36) : 61-70. doi : 10.4000/archeosciences.3744.
- IGN, 2004 – BD ORTHO® Version 2. Descriptif de contenu. Institut Géographique National, Saint-Mandé.
- IGN, SHOM., 2015 – Litto3D®, version 1.0. Description du contenu.
- JAUBERT J., VERHEYDEN S., GENTY D., SOULIER M., CHENG H., BLAMART D., BURLET C., CAMUS H., DELABY S., DELDICQUE D., EDWARDS R. L., FERRIER C., LACRAMPE-CUYAUBÈRE F., LÉVÊQUE F., MAKSUD F., MORA P., MUTH X., RÉGNIER É., ROUZAUD J.-N. et al., 2016 – Early Neanderthal constructions deep in Bruniquel Cave in southwestern France. *Nature*, **534** (7605) : 111-114. doi : 10.1038/nature18291.
- JOHNSTON M. A., SAVAGE M. J., MOOLMAN J. H. et DU PLESSIS H. M., 1997 – Evaluation of calibration methods for interpreting soil salinity from electromagnetic induction measurements. *Soil Science Society of America Journal*, **61** (6) : 1627–1633.
- JOUSSAUME, R., 1995 – Les enceintes néolithiques du Centre-Ouest de la France. Groupe vendéen d'études préhistoriques, (31) : 25–31.
- KALAYCI, T., SARRIS, A., 2016 – Multi-sensor geomagnetic prospection: a case study from Neolithic Thessaly, Greece. *Remote Sensing*, **8** (11) : 966.
- KELLER G. V., 1968 – Electrical prospecting for oil. *Quarterly of the Colorado School of Mines*, **63** (2) : 1-268.
- KENNEDY W. J. et GALE A. S., 2016 – Turonian ammonites from northwestern Aquitaine, France. *Cretaceous Research*, **58** : 265-296. doi : 10.1016/j.cretres.2015.07.011.
- KIM Y. S., OH M. H. et PARK J., 2009 – Analysis of resistivity data obtained from cone penetrometer in contaminated soil layers. *Environmental Geology*, **58** (6) : 1309-1317. doi : 10.1007/s00254-008-1634-0.
- KINAL J., STONEMAN G. L. et WILLIAMS M. R., 2006 – Calibrating and using an EM31 electromagnetic induction meter to estimate and map soil salinity in the jarrah and karri forests of south-western Australia. *Forest Ecology and Management*, **233** (1) : 78-84. doi : 10.1016/j.foreco.2006.06.003.
- KOWALCZYK S., MAŚLAKOWSKI M. et TUCHOLKA P., 2014 – Determination of the correlation between the electrical resistivity of non-cohesive soils and the degree of compaction. *Journal of Applied Geophysics*, **110** : 43-50. doi : 10.1016/j.jappgeo.2014.08.016.
- KRAUS K. et WALDHAUSL P., 1998 – *Manuel de photogrammétrie – principes et procédés fondamentaux*. HERMES., Paris, France, 394 p.
- KRIGE D. G., 1951 – A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the chemical metallurgical and mining society of South Africa*, (52) : 119-139. DOI: 10.2307/3006914
- KŘIVÁNEK R., 2006 – Magnetometric prospection of various types of large ditched enclosures in Bohemia. *Archaeological Prospection*, **13** (1) : 25-43. doi : 10.1002/arp.264.

- LADOUCHE B. et WENG P., 2005 – Hydrochemical assessment of the Rochefort marsh: Role of surface and groundwater in the hydrological functioning of the wetland. *Journal of Hydrology*, **314** (1-4) : 22-42. doi : 10.1016/j.jhydrol.2005.03.018.
- LAMBECK K., 1997 – Sea-level change along the French Atlantic and Channel coasts since the time of the Last Glacial Maximum. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **129** (1-2) : 1–22.
- LAPORTE L., 2009 – *Un secteur d'activités manufacturières sur l'habitat néolithique final de Ponthezières à Saint-Georges-d'Oléron (Charente-Maritime)*. in : *Des premiers paysans aux premiers métallurgistes sur la façade atlantique de la France (3500-2000 av. J.-C.)*. Chauvigny : Association des Publications Chauvinoises - A.P.C., p. 111-145.
- LAPORTE L., CAEMERLYNCK C., FLORSH N., LÉVÊQUE F., NÉRAUDEAU D. et OBERLIN C., 2009 – *Occupations préhistoriques et variations des lignes de rivage : l'exemple des marais charentais / Îles ou péninsules ? Évolution des milieux littoraux sur la façade atlantique du Centre-Ouest de la France au cours de l'Holocène*. in : *Des premiers paysans aux premiers métallurgistes sur la façade atlantique de la France (3500-2000 av. J.-C.)*. Chauvigny, France : Association des Publications Chauvinoises - A.P.C.
- LAPORTE L., CAEMERLYNCK C., FLORSH N., LÉVÊQUE F., NÉRAUDEAU D. et OBERLIN C., 2009 – *Occupations préhistoriques et variation des lignes de rivage : l'exemple des marais charentais*. in : *Des premiers paysans aux premiers métallurgistes sur la façade atlantique de la France (3500-2000 av. J.-C.)*. Chauvigny : Association des Publications Chauvinoises - A.P.C., p. 18-30.
- LAPORTE, L., SELLAMI, F., BOUGEANT, P., 2009 – *Architectures et organisation de l'espace - Les sites de la Prise de l'Atelier (Presqu'île d'Avert), de Ponthezières, de La Perroche et de l'Ecuissière (île d'Oléron)*, in : L. Laporte (dir.), *Des premiers paysans aux premiers métallurgistes sur la façade atlantique de la France (3500-2000 av. J.-C.)*. Association des Publications Chauvinoises - A.P.C., Chauvigny : 13–166.
- LAURENT, A., 2007 – *Evaluation du potentiel archéologique du sol en milieu urbain*. Université François Rabelais, Tours, France.
- LE BORGNE E., 1960 – Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol et sur celles du schiste et du granite. *Annales de Géophysique*, **16** : 159-196.
- LE BORGNE E., 1965 – Les propriétés magnétiques du sol. Application à la prospection des sites archéologiques. *Archaeo-Physika*, **1** : 1-20.
- LECH M., BAJDA M. et MARKOWSKA-LECH K., 2008 – The use of resistivity and seismic cone penetration tests for site characterization. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. Land Reclamation*, **40** (1). doi : 10.2478/v10060-008-0040-3.
- LECKEBUSCH J., 2005 – Precision real-time positioning for fast geophysical prospection. *Archaeological Prospection* **12** : 199-202. DOI: 10.1002/arp.269.
- LECOANET, H., LÉVÊQUE, F., SEGURA, S., 1999 – Magnetic susceptibility in environmental applications: comparison of field probes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **115** (3-4) : 191-204.
- LEHMANN F, GREEN AG., 1999 – Semiautomated georadar data acquisition in three dimensions. *Geophysics*, **64** (3): 719–731. doi : 10.1190/1.1444581

- LENOBLE A. et MARTINAUD M., 2003 – Apports du pénétrromètre à la connaissance d'un site préhistorique. Le cas de l'abri de Diepkloof, Province du Cap, Afrique du Sud. *Revue d'Archéométrie*, (27) : 27-36.
- LÉVÊQUE F. et MATHÉ V., 2015 – *Prospection magnétique 3D à haute résolution, Du site à l'objet*. in : *Méthodes et formations en archéométrie en France*. Charenton-le-Pont, France, p. 19-23.
- LINFORD N. T., 2004 – Magnetic ghosts: mineral magnetic measurements on Roman and Anglo-Saxon graves. *Archaeological Prospection*, **11** (3) : 167-180. doi : 10.1002/arp.232.
- LINFORD N., LINFORD P., MARTIN L. et PAYNE A., 2007 – Recent results from the English Heritage caesium magnetometer system in comparison with recent fluxgate gradiometers. *Archaeological Prospection*, **14** (3) : 151-166. doi : 10.1002/arp.313.
- LOKE M. H. et BARKER R. D., 1995 – Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections.pdf. *Geophysics*, **60** (6) : 1682-1690.
- LOKE M. H. et BARKER R. D., 1996 – *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method*. in : *56th EAEG meeting*. Vienne : European Association of Geoscientists et Engineers, p. 131-152.
- LOKE M. H., 2013 – Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.
- LOKE M. H., 2014 – Rapid 2-D Resistivity et IP inversion using the least-squares method. Malaysia : Geotomo software.
- LOKE M. H., ACWORTH I. et DAHLIN T., 2003 – A comparaison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Exploration Geophysics*, **34** (3) : 182-187.
- LOUBOUTIN C., 2014 – Chalignac, Le Camp. *Bilan scientifique de la région Poitou-Charentes 2013*, **20** : 41-43.
- LÜCK E. et EISENREICH M., 1999 – Geophysical prospection of archaeological sites in Brandenburg, Germany. *Archaeological Prospection*, **6** (3) : 125-133. doi : 10.1002/(SICI)1099-0763(199909)6:3<125::AID-ARP111>3.0.CO;2-U.
- MAHER B. A. et TAYLOR R. M., 1988 – Formation of ultrafine-grained magnetite in soils. *Nature*, **336** (24) : 368-370.
- MAHER B. A., 1998 – Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **137** : 25-54.
- MAQUAIRE O., RITZENTHALER A., FABRE D., AMBROISE B., THIERY Y., TRUCHET E., MALET J.-P. et MONNET J., 2002 – Caractérisation des profils de formations superficielles par pénétrrométrie dynamique à énergie variable : application aux marnes noires de Draix (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Comptes Rendus Geoscience*, **334** (11) : 835–841.
- MARTINAUD M., 1990 – Intérêts du dispositif bipôle C-P en prospection électrique non mécanisée. *Revue d'Archéométrie*, (14) : 5-16.
- MARTINAUD M., 1997 – La pratique de la méthode électrique par une unité de service en prospection archéologique. Choix des quadripôles et exemples de résultats. *Revue d'Archéométrie*, (21) : 5-20.

- MARTINAUD M., BARET C., GAMBIER D., MADANI F., MORALA A., MOUILLAC L., ROYERE J. et SIREIX C., 1999 – Sur l'intégration de résultats géophysiques avec des résultats de sondages mécaniques ponctuels. *Revue d'Archéométrie*, **23** (1) : 33-45. doi : 10.3406/arsci.1999.973.
- MARTINAUD, M., 2005 – Prospection géophysique et sites préhistoriques. *Archéologie & sciences des origines*, (308) : 26–34.
- MATHÉ V. et ARD V., 2015 – *Dynamiques d'occupation et d'exploitation du sel dans les golfes charentais, du Néolithique à l'Âge du Fer*. La Rochelle, France : UMR 7266 LIENSs, DRAC-SRA Poitou-Charentes, 127 p.
- MATHÉ V. et ARD V., 2016 – *Dynamiques d'occupation et d'exploitation du sel dans les golfes charentais, du Néolithique à l'Âge du Fer*. La Rochelle, France : UMR 7266 LIENSs, DRAC-SRA Poitou-Charentes, 214 p.
- MATHÉ V. et LÉVÊQUE F., 2003 – High resolution magnetic survey for soil monitoring: detection of drainage and soil tillage effects. *Earth and Planetary Science Letters*, **212** (1-2) : 241-251. doi : 10.1016/S0012-821X(03)00241-3.
- MATHÉ V. et LÉVÊQUE F., 2005 – Trace magnetic minerals to detect redox boundaries and drainage effects in a marshland soil in western France. *European Journal of Soil Science*, (56) : 737-751. doi : 10.1111/j.1365-2389.2005.00709.x.
- MATHÉ V., 2010 – Apports de la prospection électromagnétique à la question de l'embarcadère antique de Brion (Saint-Germain-d'Esteuil, Gironde). *Aquitania*, (26) : 137-145.
- MATHÉ V., CAMUS A., MARTINAUD M., BARRAUD D., PICHONNEAU J.-F. et TASSAUX F., 2012 – Prospections géophysiques multi-méthodes du site gallo-romain de Brion (Gironde, France) : une agglomération secondaire en zone humide. *ArcheoSciences, revue d'archéométrie*, **36** : 173-189.
- MATHÉ V., LÉVÊQUE F., MATHÉ P.-E., CHEVALLIER C. et PONS Y., 2006 – Soil anomaly mapping using a caesium magnetometer: Limits in the low magnetic amplitude case. *Journal of Applied Geophysics*, **58** (3) : 202-217. doi : 10.1016/j.jappgeo.2005.06.004.
- MATHÉ V., MARTINAUD M., GARMY P. et BARRAUD D., 2011 – L'agglomération antique de Brion à Saint-germain-d'Esteuil (Gironde) Organisation de l'espace, structures et formes de l'urbanisme. *Aquitania*, **27** : 215-242.
- MATHÉ V., SANCHEZ C., BRUNIAUX G., CAMUS A., CAVERO J., FAÏSSE C., JÉZÉGOU M.-P., LABUSSIÈRE J. et LÉVÊQUE F., 2016 – Prospections géophysiques multi-méthodes de structures portuaires antiques à Narbonne (Aude, France). *ArcheoSciences, revue d'archéométrie*, (40) : 47-63.
- MATHÉ, V., LÉVÊQUE, F., DRUEZ, M., ARD, V., 2012 – *Qu'apporte la prospection géophysique à l'étude d'un champ néolithique ? L'exemple du site de Bellevue à Chenommet (Charente)*. in : *9ème Rencontres Méridionales de Préhistoire récente*. Saint-Georges-de-Didonne, 8 octobre 2012, 135–140.
- MCNEILL J. D., 1980a – Electrical conductivity of soil and rocks. Ontario : Geonics limited, 20 p.
- MCNEILL J. D., 1980b – Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Ontario : Geonics limited, 13 p.
- MOBERG J., 2012 – ABEM Terrameter LS, v. 1.11. Stockholm : ABEM, 120 p.

- MOREAU P. et PLATEL J.-P., 1982 – L'évolution paléogéographique de la plate-forme Nord-aquitaine durant le Crétacé supérieur. *Cretaceous Research*, (3) : 47-55.
- NOWACZINSKI E., SCHUKRAFT G., RASSMANN K., REITER S., MÜLLER-SCHEEBEL N., HECHT S., EITEL B., BUBENZER O. et BÁTORA J., 2015 – A Multidimensional Research Strategy for the Evaluation of Settlement Pits: 3D Electrical Resistivity Tomography, Magnetic Prospection and Soil Chemistry: A Research Strategy for the Evaluation of Settlement Pits. *Archaeological Prospection*, **22** (4) : 233-253. doi : 10.1002/arp.1510.
- NYQUIST J. E. et BLAIR M. S., 1991 – A geophysical tracking and data logging system: Description and case history. *Geophysics*, **56** (7) : 1114–1121.
- OLDENBURG D. W. et LI Y., 1999 – Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys. *Geophysics*, **64** (2) : 403–416.
- PARASNIS D. S., 1984 – *Principles of applied geophysics*. 5ème édition., Royaume-Unis : Chapman et Hall, 176 p.
- PAUTREAU J.-P., 1976 – L'habitat Peu-richardien de la Sauzaie (Commune de Soubise, Charente-Maritime). *Revue archéologique du Centre de la France*, **15** (3-4) : 350.
- PERRICHOT V., 2003 – *Environnements paraliques à ambre et à végétaux du Crétacé Nord-Aquitain (Charentes, Sud-Ouest de la France)*. Rennes : Université Rennes 1, 310 p.
- PLATEL J.-P., 1996 – Stratigraphie, sédimentologie et évolution géodynamique de la plate-forme carbonatée du Crétacé supérieur du nord du bassin d'Aquitaine. *Géologie de la France*, (4) : 33-58.
- PLATEL, J.-P., MOREAU, P., VOUVÉ, J., DEBENATH, A., COLMONT, G.R., GABET, C., 1976 – *Carte géologique de la France à 1/50 000*, feuille Saint-Agnant XIV-31 et Notice explicative (682).
- POWER, J.F., SANDOVAL, F.M., RIES, R.E., MERRILL, S.D., 1981 – Effects of topsoil and subsoil thickness on soil water content and crop production on a disturbed soil. *Soil Science Society of America Journal*, **45** (1) : 124–129.
- RAZAFINDRATSIMA S. et LATASTE J.-F., 2014 – Estimation of the error made in Pole–Dipole Electrical Resistivity Tomography depending on the location of the remote electrode: Modeling and field study. *Journal of Applied Geophysics*, **100** : 44-57. doi : 10.1016/j.jappgeo.2013.10.008.
- REGAIN R., 1980 – *Géographie physique et télédétection des marais charentais*.
- REYNOLDS J. M., 1997 – *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. 2nd édition., Chichester : John Wiley et Sons Ltd., 796 p.
- ROBIN, M., 1995 – *Télédétection, des satellites aux SIG*. 2nd édition. Nathan Université, Paris.
- ROY A. et APPARAO A., 1971 – Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, (36) : 943-959.
- ROY A., 1975 – New results in resistivity well logging. *Geophysical Prospecting*, **23** (3) : 426–448.
- ROY K. K. et DUTTA D. J., 1997 – Relative performance of focused and unfocused devices in a 2D borehole environment. *Journal of Applied Geophysics*, **36** : 181-194.
- RUDOLPH, S., VAN DER KRUK, J., VON HEBEL, C., ALI, M., HERBST, M., MONTZKA, C., PÄTZOLD, S., ROBINSON, D.A., VERECKEN, H., WEIHERMÜLLER, L., 2015 – Linking satellite derived LAI

- patterns with subsoil heterogeneity using large-scale ground-based electromagnetic induction measurements. *Geoderma*, **241–242** : 262–271.
- SAEY T., ISLAM M. M., DE SMEDT P., MEERSCHMAN E., VAN DE VIJVER E., LEHOUCQ A. et VAN MEIRVENNE M., 2012 – Using a multi-receiver survey of apparent electrical conductivity to reconstruct a Holocene tidal channel in a polder area. *CATENA*, **95** : 104-111. doi : 10.1016/j.catena.2012.02.001.
- SALAMA R. B., BARTLE G., FARRINGTON P. et WILSON V., 1994 – Basin geomorphological controls on the mechanism of recharge and discharge and its effect on salt storage and mobilization— Comparative study using geophysical surveys. *Journal of Hydrology*, **155** (1-2) : 1–26.
- SAMOUELIAN A., COUSIN I., TABBAGH A., BRUAND A. et RICHARD G., 2005 – Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage Research*, **83** (2) : 173-193. doi : 10.1016/j.still.2004.10.004.
- SANCHEZ C. et JÉZÉGOU M.-P., 2011 – *Espaces littoraux et zones portuaires de Narbonne et sa région dans l'Antiquité*. ADAL., Lattes : UMR 5140 - CNRS, 291 p.
- SANCHEZ C. et JÉZÉGOU M.-P., 2014 – *Les ports antiques de Narbonne*. Narbonne, France : Parc naturel régional de la Narbonnaise en Méditerranée, 100 p.
- SANCHEZ C., 2014 – *Les ports antiques de Narbonne (Aude)*. Lattes/Montpellier, France : UMR 5140 ASM, DRAC-SRA Languedoc-Roussillon-Midi-Pyrénées, 316 p.
- SANCHEZ C., FABRE J.-M., GUERRE J., LABUSSIÈRE J., MIGNOT O. et RIVALS C., 2011 – Le Grand Castélou et Mandirac (Narbonne). Les fouilles du Grand Castelou/Mandirac. Rapport de fouille programmée 2011.
- SANCHEZ C., FAVENNEC B., CARRATO C., LEMAÎTRE S. et SILVÉRÉANO S., 2011 – *Recherches récentes sur les contextes portuaires de Narbonne (Aude) : les fouilles du Grand Castélou et de Port-la-Nautique*. in : *S.F.E.C.A.G., congrès d'Arles*. Arles, France : Société Française d'Etude de la Céramique Antique en Gaule (S.F.E.C.A.G.), p. 171-201.
- SCHLUMBERGER C., SCHLUMBERGER M. et LEONARDON E. G., 1934 – Electrical Coring: A Method of Determining Bottom-Hole Data by Electrical Measurements. *Transactions of the AIME*, **110** (1) : 237–272.
- SCHULMEISTER M. K., BUTLER J. J., HEALEY J. M., ZHENG L., WYSOCKI D. A. et MCCALL G. W., 2003 – Direct-Push Electrical Conductivity Logging for High-Resolution *Hydrostratigraphic Characterization*. *Groundwater Monitoring et Remediation*, **23** (3) : 52–62.
- SCOLLAR I., TABBAGH A., HESSE A. et HERZOG I., 1990 – *Archaeological prospecting and remote sensing*. Cambridge, Great Britain : Cambridge University Press, 674 p.
- SELLWOOD S. M., HEALEY J. M., BIRK S. et BUTLER J. J., 2005 – Direct-Push Hydrostratigraphic Profiling: Coupling Electrical Logging and Slug Tests. *Groundwater*, **43** (1) : 19–29.
- SIMONI G. et VANNUCCHI G., 2006 – Use of a resistivity cone and a fuel fluorescence detector for the detection and mapping of contaminated sites. *Rivista Italiana di Geotecnica*, (3).
- SLATER L. D. et REEVE A., 2002 – Investigating peatland stratigraphy and hydrogeology using integrated electrical geophysics. *Geophysics*, **67** (2) : 365–378.
- SMITH WHF, WESSEL P., 1990 – Gridding with continuous curvature splines in tension. *Geophysics*, **55** (3) : 293–305. doi : 10.1190/1.1442837

- SOLER, L., 2012 – *Le site des 4 Chevaliers à Périgny (Charente-Maritime) - Présentation et contexte chrono-culturel d'une enceinte du Néolithique moyen du Centre-Ouest de la France*, in : *CrabeNéo, Enceintes néolithiques de l'Ouest de la France de la Seine à la Gironde*. Volume XLVIII. Historial de la Vendée, Les Lucs-sur-Boulogne, septembre 2012, 99–115.
- SOLER, L., MATHÉ, D., ARD, V., BEDAULT, L., 2010 – *Découverte de mobilier Peu-Richardien en contexte de marais associé à une enceinte à fossé multiples en Charente-Maritime*, In : *9ème Rencontres Méridionales de Préhistoire Récente, Dynamismes et rythmes évolutifs des sociétés de la Préhistoire récente*. Saint-Georges-de-Didonne, 8 octobre 2010, 177–194.
- SOUCHON, J.-P., PAPANODITIS, N., MARTIN, O., MEYNARD, C., THOM, C., 2006 – Is there an ideal digital aerial camera? The International Archives of the Photogrammetry. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **36** (1) : 29–34.
- SPIES B. R., 1996 – Electrical and electromagnetic borehole measurements: a review. *Surveys in Geophysics*, **17** : 517-556.
- STANJEK, H., FASSBINDER, J.W.E., 1995 – Soil aspects affecting archaeological details in aerial photographs. *Archaeological Prospection*, **2** (2) : 91–101.
- SUDDUTH K. A., DRUMMOND S. T. et KITCHEN N. R., 2001 – Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. *Computers and electronics in agriculture*, **31** (3) : 239–264.
- SZALAI S. et SZARKA L., 2008 – On the classification of surface geoelectric arrays. *Geophysical Prospecting*, **56** (2) : 159-175. doi : 10.1111/j.1365-2478.2007.00673.x.
- TABBAGH A., DABAS M., HESSE A. et PANISSOD C., 2000 – Soil resistivity: a non-invasive tool to map soil structure horization. *Geoderma*, **97** (3) : 393–404.
- TELFORD W. M., GELDART L. P. et SHERIFF R. E., 2004 – *Applied Geophysics (Second Edition)*. Cambridge : Cambridge University Press.
- THOMPSON R. et OLDFIELD F., 1986 – *Environmental Magnetism*. Dordrecht : Springer Netherlands.
- TITE M. S. et MULLINS C., 1971 – Enhancement of the magnetic susceptibility of soils on archaeological sites. *Archaeometry*, **13** (2) : 209–219.
- TRIMBLE., 2015 – Station totale Trimble S8, fiche technique.
- TSOURLLOS P., PAPADOPOULOS N., YI M.-J., KIM J.-H. et TSOKAS G., 2014 – Comparison of measuring strategies for the 3-D electrical resistivity imaging of tumuli. *Journal of Applied Geophysics*, **101** : 77-85. doi : 10.1016/j.jappgeo.2013.11.003.
- VERDEIL P., 1970 – Données nouvelles sur le Quaternaire de la basse vallée de l'Aude. *Bulletin de la Société Géologique de France*, (12) : 413-425.
- VERHEGGE J., MISSIAEN T. et CROMBÉ P., 2016 – Exploring Integrated Geophysics and Geotechnics as a Paleolandscape Reconstruction Tool: Archaeological Prospection of (Prehistoric) Sites Buried Deeply below the Scheldt Polders (NW Belgium): Geophysics and Geotechnics as a Palaeolandscape Reconstruction Tool. *Archaeological Prospection*, **23** (2) : 125-145. doi : 10.1002/arp.1533.
- WESTON D. G., 2002 – Soil and susceptibility: aspects of thermally induced magnetism within the dynamic pedological system. *Archaeological Prospection*, **9** (4) : 207-215. doi : 10.1002/arp.196.

- WOLLENHAUPT N. C., RICHARDSON J. L., FOSS J. E. et DOLL E. C., 1986 – A rapid method for estimating weighted soil salinity from apparent soil electrical conductivity measured with an aboveground electromagnetic induction meter. *Canadian Journal of Soil Science*, **66** (2) : 315–321.
- YOON G. L. et PARK J. B., 2001 – Sensitivity of leachate and fine contents on electrical resistivity variations of sandy soils. *Journal of hazardous materials*, **84** (2) : 147–161.
- ZHOU B. et DAHLIN T., 2003 – Properties and effects of measurement errors on 2D resistivity imaging surveying. *Near Surface Geophysics*, **1** (3) : 105–117.

ANNEXES

Annexe 1 : Carottages et analyses associées du site du Pontet (par Carole Romey)

Quatre carottages ont été réalisés en utilisant un système de percussion (Cobra) avec des tubes de 5 cm de diamètre :

- « Soubise 1 » (S1, 4,2 m) et « Soubise 2 » (S2, 6 m) en aval du site archéologique, en octobre 2014 (GEODE, Toulouse, France) en collaboration avec Laurent Carozza et Albane Burens ;

- « Soubise 3 » (S3, 8 cm) et « Soubise 4 » (S4, 7,5 m) en amont du site archéologique, en novembre 2015 (LETG, Brest, France) en collaboration avec Pierre Stephan.

La chrono-stratigraphie a été réalisée par radio-datation AMS au Poznań Radiocarbon Laboratory (Poland), sur deux graines prélevées dans Soubise2. Les carottes ont été échantillonnées en continue avec des cubes de 8 cm³. Les différentes analyses portant sur les carottes S1 et S2 ont ensuite été réalisées sur ces cubes.

La granulométrie a été déterminée avec un granulomètre laser MASTERSIZER 2000 (IUEM, Brest). Afin de pallier les biais de traitement de signal par le logiciel du fait des hautes teneurs en carbonate de calcium, l'indice de réfraction des carbonates ($RI = 1.48$) a été utilisé préférentiellement à l'indice de réfraction de la kaolinite (Romey *et al.*, 2015).

Les teneurs en CaCO₃ et C_{org} ont été déterminées par la perte au feu sur Soubise2. Les échantillons pesés (environ 1 g) ont été chauffés à 375°C pendant 16h puis pesés à froid pour obtenir %C_{org}. Ensuite les échantillons ont été de nouveau chauffés à 1100°C pendant 5h puis pesés à froid pour obtenir %CaCO₃. La calibration des données %CaCO₃ et %C_{org} a été faite à partir de 5 échantillons analysés avec un CNS NA 1500 série 2.

Les analyses de susceptibilité magnétique ont été faites sur les échantillons cubiques au Kappa Bridge KLY4. Les aimantations rémanentes naturelles, anhystériques et isothermes (ARN, ARA et ARI) ont été mesurées avec un magnétomètre spinner JR6 (*Agico*). L'ARA a été acquise avec un champ de 200 mT AF et un courant continu de 100 μ T suivant l'axe Z. L'aimantation rémanente isotherme à saturation (SiRM) a été acquise à 3 T avec un Pulse magnetizer MMPM 10 (*Magnetic Instruments*). Le backfield de l'ARI (BF ARI) a été réalisé afin d'obtenir la courbe de changement de la minéralogie magnétique. La susceptibilité magnétique des carottes S3 et S4 a été obtenue avec un susceptibilimètre Bartington MS2C avec un pas de mesure de 1 cm.

Annexe 2 : Prospections géophysiques sur les zones de l'Étangs du Cercle et de l'« autoroute » (Narbonne)

1 LA ZONE DE L'ÉTANGS DU CERCLE

C'est dans la zone de l'Étangs du Cercle que les probables formations de la plaine alluviale de la Robine (et de l'ancien cours de l'Aude) sont les plus large (Figure 1). Les possibilités de passage de l'ancien chenal du fleuve sont donc nombreuses. De ce fait, des grandes sections de résistivité électrique ont été réalisées en plusieurs tronçons (plus 730 m pour la plus grande) correspondant aux transects 1, 2 et 3. Ils ont été réalisés dans les grandes parcelles perpendiculaires au Canal de la Robine. Le transect 1 a été détaillé dans le Chapitre V de la thèse. Deux prospections électromagnétiques à l'EM31 et à l'EM38 ont été effectuées sur les parcelles au niveau du transect 3.

1.1 LE TRANSECT 2 : SECTIONS 4, 3, 2 ET 5

Le transect 2 est parallèle au transect 1 et il est localisé à environ 480 m plus au sud (Figure 1). Les sections 4 et 3, du transect 2, sont implantées sur la rive est de la Robine. Les sections 2 et 5 sont sur la rive ouest. Elles sont perpendiculaires au Canal de la Robine, orientées SEE-NWW, sauf pour la section 5 qui est orientée NE-SW. Ce transect est le plus long et il permet d'obtenir la répartition verticale des résistivités de la subsurface sur une distance d'environ 730 m. Les anomalies topographiques, de 30 cm de hauteur environ, indiquées sur les transects 1 et 2 correspondent vraisemblablement à des parcelles anciens (Figure 2).

L'ensemble E1 est aussi identifié sur ce transect 2 (Figure 3). Il est présent sur l'ensemble des sections 2 et 5. Sur ces sections, E1 présente un gradient de résistivité décroissant depuis l'est vers l'ouest. Il passe ainsi des milieux N5 à N4 depuis la Robine vers *l'Ancien Étang du Cercle*. Sur la section 2, E1 est globalement homogène et majoritairement composé par le milieu N5. Vers l'ouest, au niveau du milieu de la section 5, la transition entre les milieux N5 et N4 est franche. Sur la rive est de la Robine, E1 (caractérisé par le milieu N5 sur les sections 4 et 3) présente une épaisseur moins importante sur l'autre rive de la Robine. L'épaisseur d'E1 s'amincit vers l'est. Comme pour le transect précédent, l'ensemble E1 pourrait correspondre à des alluvions sableuses de la plaine alluviale de la Robine. Entre les sections 4 et 3 (rive est) et la section 2 (rive ouest), la résistivité électrique du milieu N5 sur les sections 4 et 3 est plus faible que sur la section 2. De même que pour l'épaisseur d'E1 qui est plus important sur la rive ouest que sur la rive est. Pourtant il n'y qu'une trentaine mètres entre les deux rives. Ceci pourrait traduire une forte variabilité latérale de ces milieux sédimentaires. L'ensemble E2, composé par les milieux N1 et N2 est présent sous E1. Il est associé à des vases lagunaires

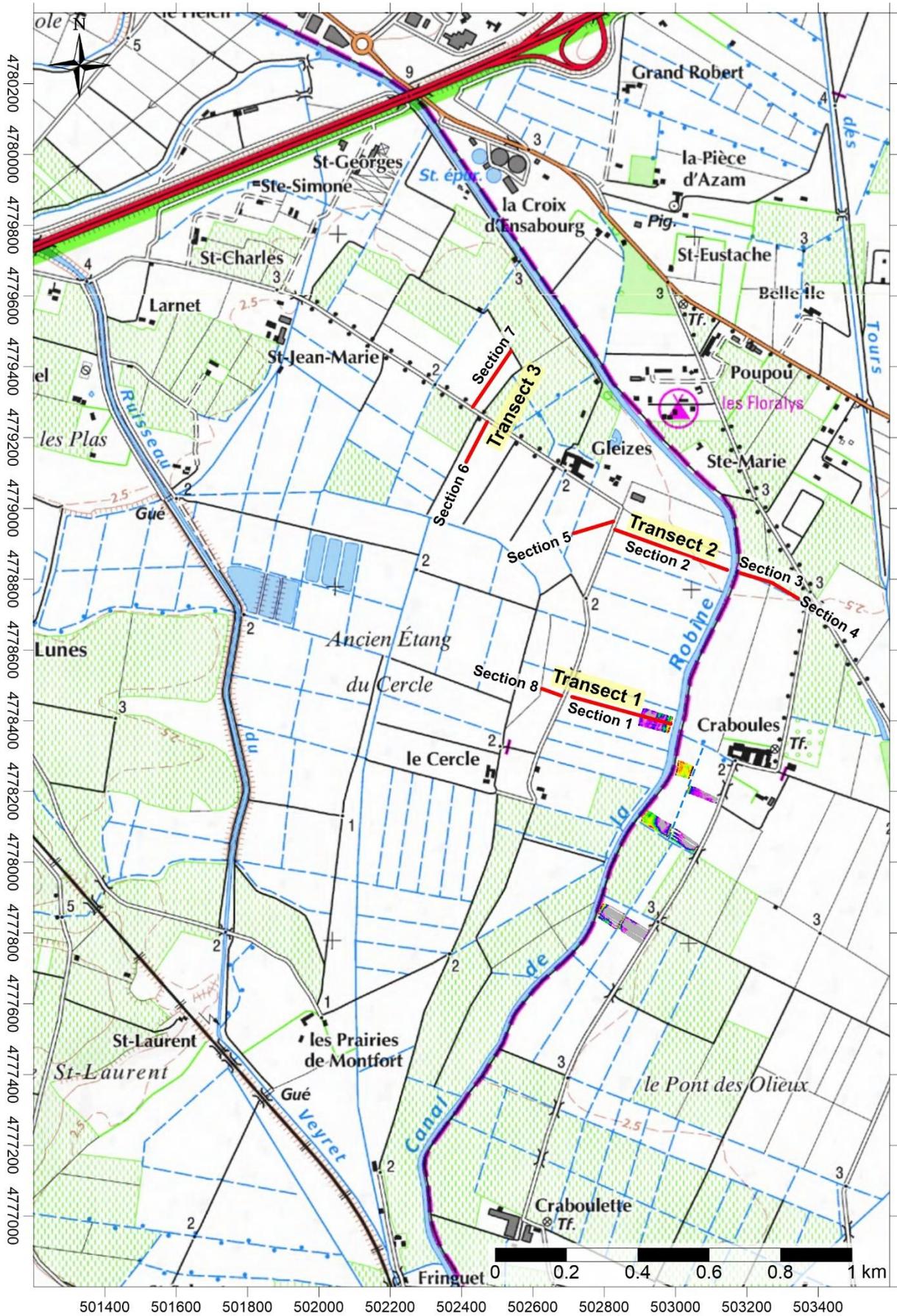


Figure 1 : Localisation des transects de résistivité électrique 1, 2 et 3 réalisés dans la zone de l'Étang du Cercle.

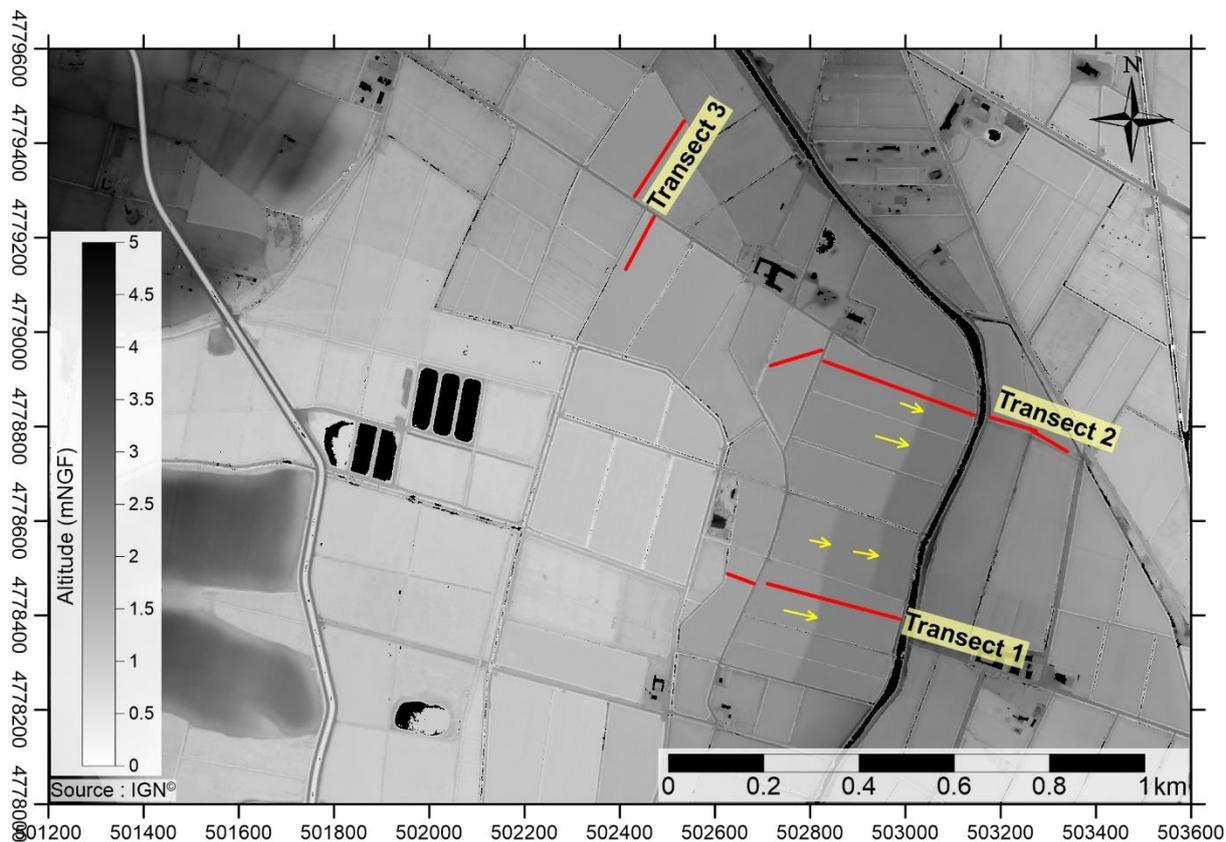


Figure 2 : Carte altimétrique de la zone de l'Étang du Cercle avec la localisation des transects de résistivité électrique 1, 2 et 3. Les flèches jaunes indiquent la position d'anomalie topographique linéaire indiquées sur les transects 1 et 2.

Les anomalies en creux, identifiées sur le transect 1 et composées par le milieu N3, sont aussi visibles sur le transect 2 (Figure 3). Elles ne semblent pas non plus correspondre à des paléo-chenaux. La structure la plus intéressante sur ce transect 2 se localise sur la section 5. En effet, une anomalie en forme de chenal est clairement identifiable (P4). Elle mesure une quarantaine de mètre de large pour une profondeur de 5 à 2,5 m. Elle est caractérisée par le milieu N3. De par sa morphologie et sa signature électrique, elle se rapproche des paléo-chenaux identifiés sur les sections de la zone de Craboulette et de Craboules (anomalie P1) et du chenal C dans la zone Mandirac. Afin de poursuivre les investigations, une carte de conductivité électrique apparente (CEa) et un troisième transect ont été réalisés plus au sud afin d'identifier la continuité de l'anomalie en forme de chenal (P4).

1.2 LE TRANSECT 3 : SECTION 6, 7, 9 ET 10

Le transect 3 est composé par les sections de résistivité électrique 6, 7 et 8 (environ 300 m de long), orienté SWW-NEE (Figure 1). Il est localisé à environ 400 m du transect 2 sur la rive ouest du Canal de la Robine. Les cartes de CEa ont été réalisées sur les parcelles proches du transect 3, au nord du lieu-dit Gleizes et à proximité du Canal de la Robine (Figure 4).

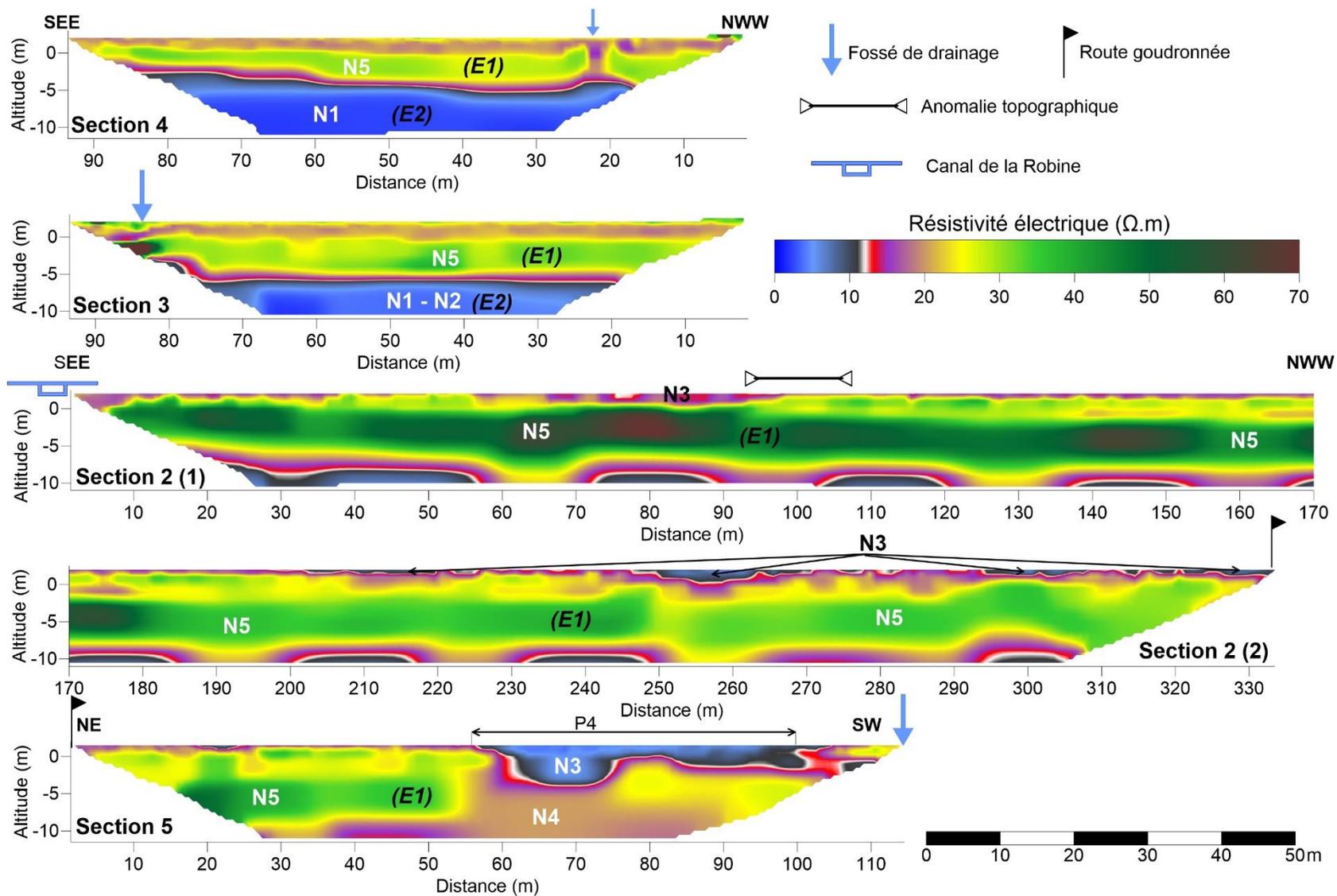


Figure 3 : Transect de résistivité électrique 2, composé par les sections 4, 3, 2 et 5, réalisé dans la zone de l'Étang du Cercle.

1.2.1 Les cartes de la conductivité électrique apparente

Les résultats des prospections électromagnétiques sont illustrés sur la Figure 4. Les cartes de CEa mesurée avec le conductivimètre EM38 mettent en évidence une anomalie plus résistante au sud caractérisée par des valeurs inférieures à 20 mS/m (Figure 4a et 4b). Cette anomalie est aussi visible sur la carte de CEa réalisée avec le conductivimètre EM31 (valeurs inférieures à 40 mS/m, Figure 4c). La carte du signal en phase de l'EM31 présente des valeurs légèrement plus faibles au niveau de cette anomalie plus résistante (Figure 4d). Cette anomalie pourrait correspondre à une zone légèrement plus sableuse mais pourrait aussi être liée à l'effet de drainage à proximité du canal (Camus, 2008 ; Camus *et al.*, 2011). Une autre structure résistante est localisée au nord de la parcelle sur la carte de conductivité de l'EM31 (Figure 4c). Elle semble être associée à l'effet de drainage liée à la proximité d'un canal.

Une anomalie conductrice de forme allongée est visible sur les cartes de CEa de l'EM38 (à 1 m) et de l'EM31 (P7, Figure 4a et 4c). Cette anomalie P7 possède la même signature de conductivité électrique que l'anomalie P6-b sur la zone de l'autoroute (50 à 70 mS/m). Sur la carte du signal en phase (Figure 4d), cette anomalie est associée à une variation positive indiquant la présence de matériaux plus argileux. L'anomalie P7 possède des dimensions proches de celles de la structure P6-b : largeur de 30 à 50 m.

Une anomalie très conductrice (supérieure à 100 mS/m) est présente au SW (Figure 4a, 4b et 4c). Elle est probablement associée à une forte teneur en argile ou à une salinité élevée car les CEa sont supérieures à 150 mS/m en son centre et le signal en phase présente des variations très importantes (Figure 4c et 4d).

1.2.2 Les sections de résistivité électrique

Les sections 6 et 7 présentent des milieux plus conducteurs composés par N2 et N3 (2,5 à 5 Ω .m et 5 à 10 Ω .m) visibles sur l'ensemble des deux sections jusqu'à la position 140 m de la section 7 (Figure 5). La partie est de la section est caractérisée par un milieu plus résistant composé par le milieu N4 (10 à 20 Ω .m), présent en surface et avec une épaisseur d'environ 10 m. Ce milieu N4 est aussi retrouvé sous forme de deux couches résistantes localisées plus en profondeur à -2,5 m sur la section 6 et à -3,5 m à l'ouest de la section 7. L'anomalie P5 très conductrice N2, formant une dépression, possède une largeur d'environ 60 m pour une épaisseur de 4,5 m. La zone très conductrice identifiée au SW des cartes de CEa est vraisemblablement associée aux milieux très conducteurs (N3 et N2) et à cette anomalie P5 sur les sections 6 et 7. La transition qui est observée sur la section 7, entre l'anomalie plus résistante (N4) au NNE et P5, est probablement la même que celle observée sur les cartes de conductivité entre l'anomalie P7 et la zone très conductrice au SW (Figure 4c et 5).

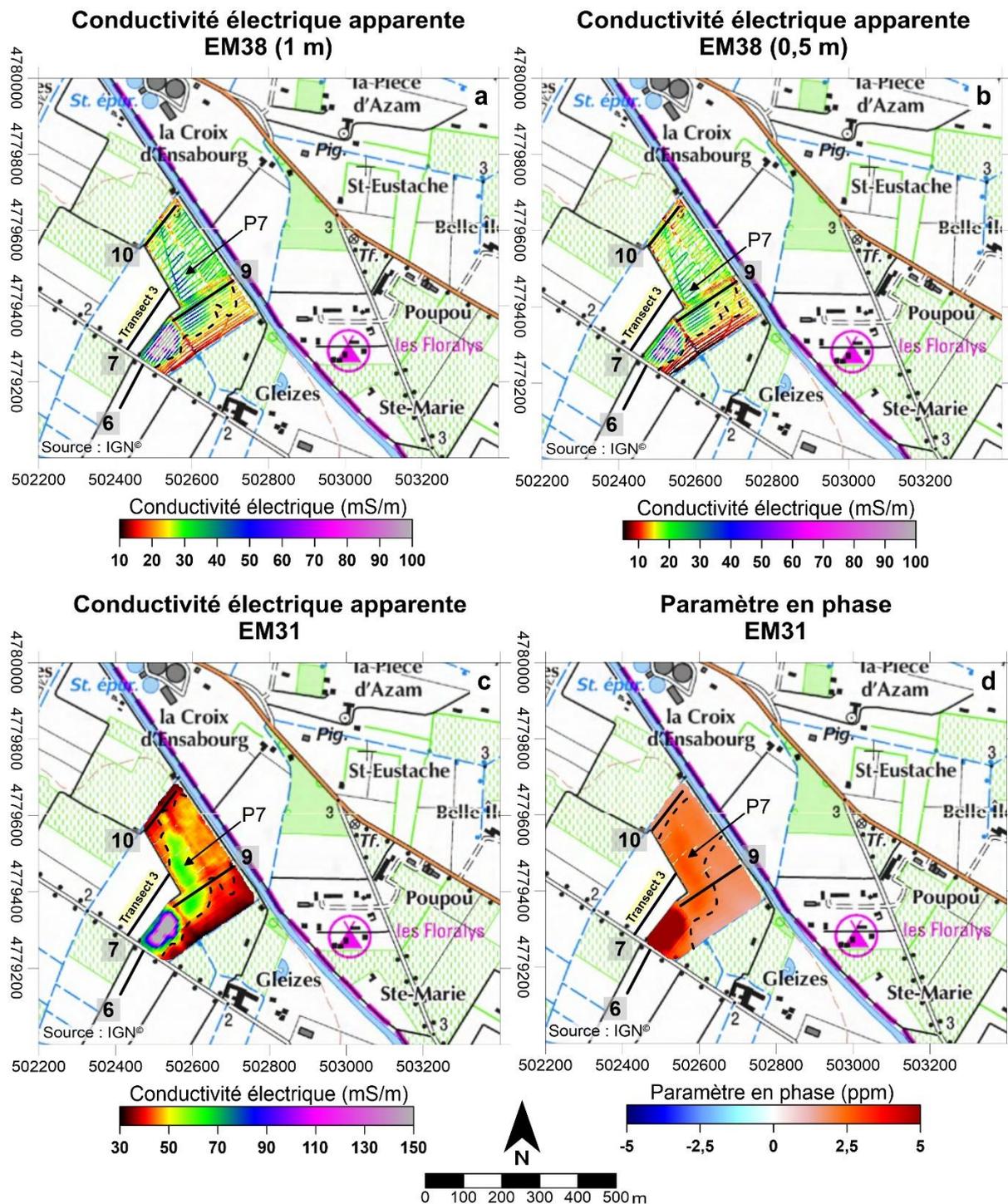


Figure 4 : Prospections électromagnétiques acquises dans la zone de l'Étang du Cercle. (a) Carte de la conductivité électrique apparente pour une profondeur d'investigation d'environ 1,5 m (EM38). (b) Carte de la conductivité électrique apparente pour une profondeur d'investigation d'environ 0,75 m (EM38). (c) Carte de la conductivité électrique apparente pour une profondeur d'investigation comprise entre 1,5 et 5 m (EM31). (d) Carte du signal en phase (EM31).

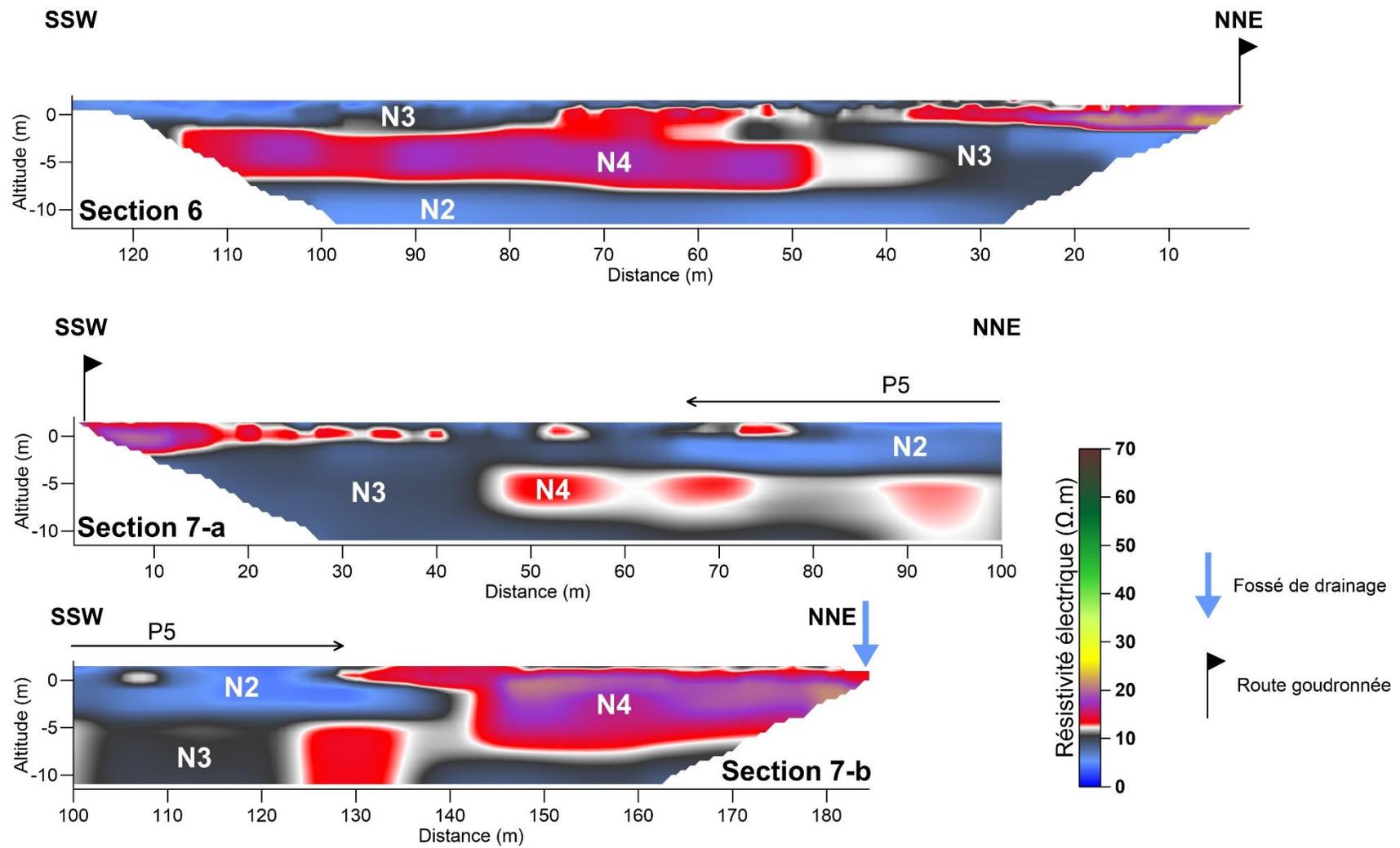


Figure 5 : Sections de résistivité électrique 6 et 7 du transect 3 réalisées dans la zone de l'Étang du Cercle.

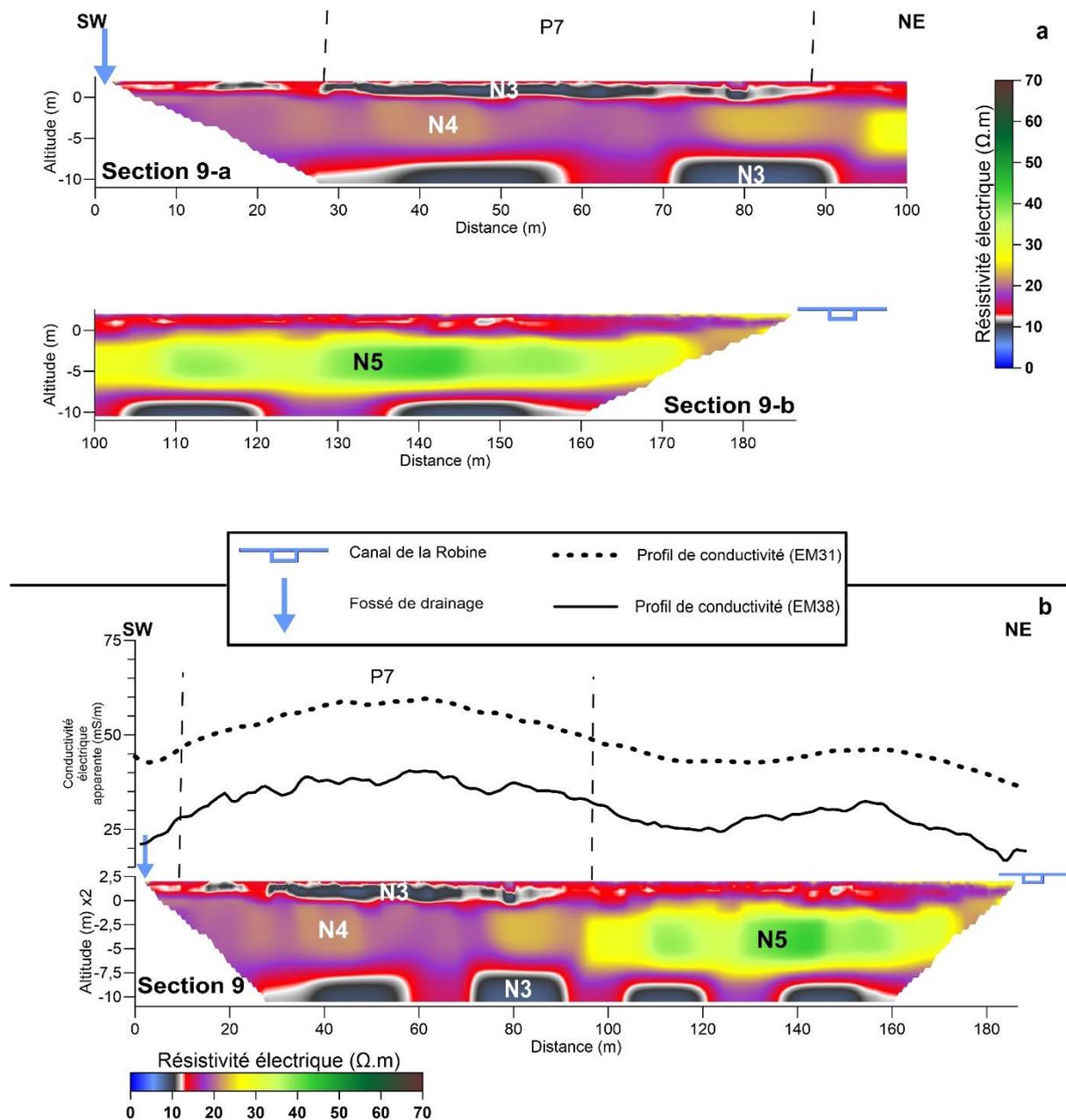


Figure 6 : (a) Section de résistivité électrique 9 du transect 3 réalisées dans la zone de l'Étang du Cercle. (b) Section de résistivité électrique 9 associée avec les profils de conductivité électrique de l'EM31 et de l'EM38.

La section 9 est positionnée en continuité des sections 6 et 7, orientée SW-NE. Elle est principalement composée par les milieux N4 et N5 (Figure 6a) formant ainsi un ensemble résistant continu avec les anomalies plus résistante N4 au NNE de la section 7 (Figure 5 et 6a). L'ensemble résistant de la section 9 est donc caractérisé par le milieu N4 dans la partie SW et le milieu N5 dans la partie NE (Figure 6a). La transition entre ces deux milieux est bien marquée au niveau de la position 95 m de la section. Cet ensemble correspond à l'ensemble résistant E1 identifié sur les transects 1 et 2, plus au sud, de l'Étang du Cercle (Figure 3). La même répartition des résistivités de la subsurface des transects 1 et 2 est observée sur le transect 3. La résistivité décroît en s'éloignant de la Robine.

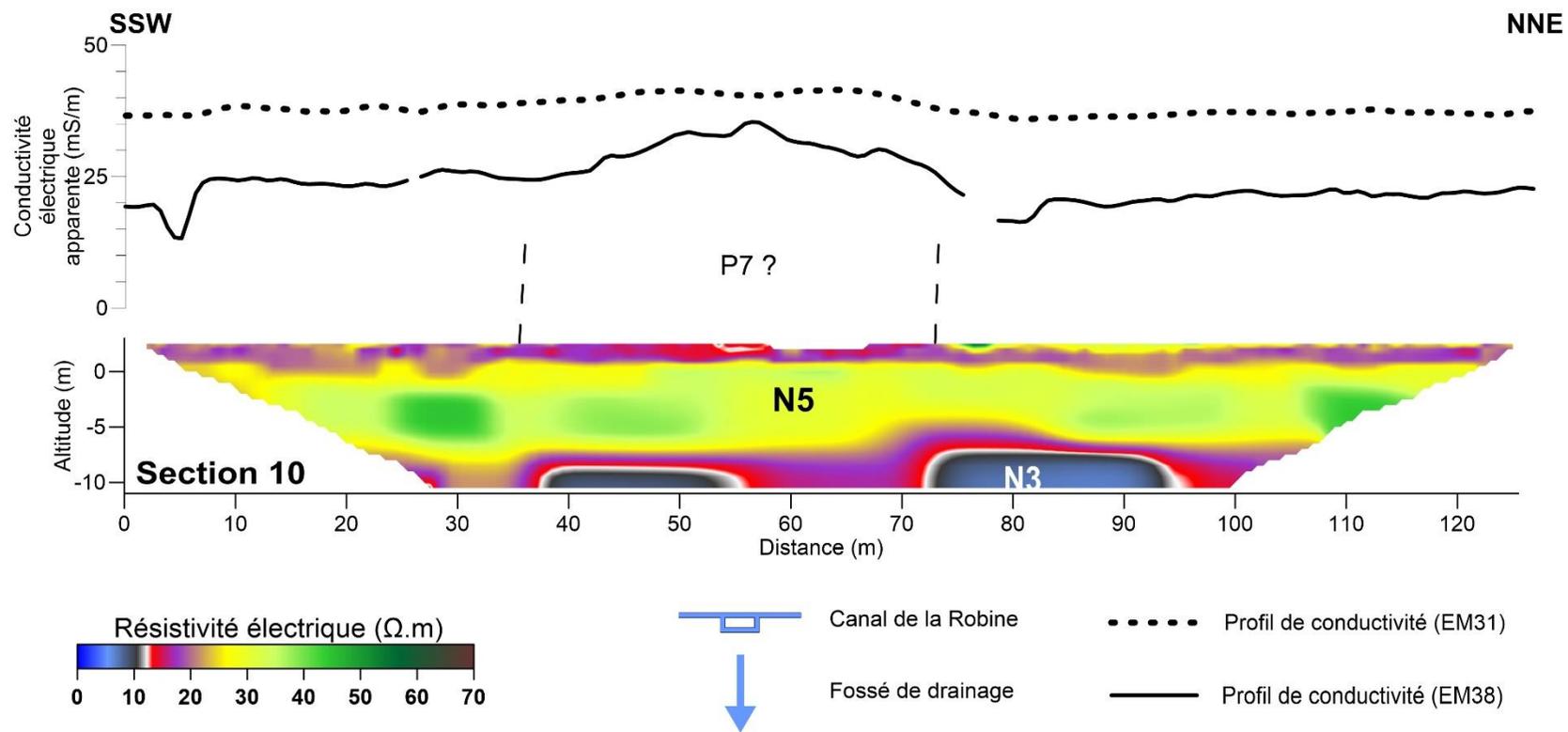


Figure 7 : Section de résistivité électrique 10 réalisée dans la zone de l'Étang du Cercle.

Les profils de conductivité électrique de l'EM38 et de l'EM31 sont représentés en parallèle de la section 9 sur la Figure 6b. Une fine couche plus conductrice (moins de 2 m d'épaisseur) est présente en surface et elle est caractérisée par le milieu N3 dans la partie SW de la section. Les variations de la conductivité sur les profils semblent être liées à cette couche et aussi à la transition entre les milieux N4 et N5. De ce fait, l'anomalie P7 identifiée sur les cartes de CEa correspond probablement à une structure conductrice de forme allongée avec une profondeur d'environ 2 m. Elle ne semble pas correspondre à un paléo-chenal.

La section 10 a été positionnée à 215 m plus au nord et en parallèle de la section 9 (Figure 4). Cette section est relativement homogène car elle est dominée par le milieu N5 de part et d'autre. Les profils de conductivité sont représentés en parallèle de la section 10 (Figure 7). Le profil de l'EM38 possède à un faible gradient (10 mS/m) localisée au-dessus d'une fine couche plus conductrice présente en surface (1,8 m d'épaisseur). Elle est probablement la continuité de l'anomalie P7 sur la section 9.

1.3 CONCLUSIONS

Les différents transects effectués dans la zone de l'Étang du Cercle permettent de caractériser des formations sédimentaires (alluvions sableuses et fines) pouvant être associées à l'ancienne plaine alluviale du fleuve de l'Aude. Ces formations sont larges et profondes et sont présentes de part et d'autre du Canal de la Robine. Dans ces formations, une structure en forme de chenal a été identifiée (P4). Elle possède une signature électrique et une morphologie similaire aux autres chenaux identifiés sur les sections de résistivité électrique réalisées plus au sud (zones de Fringuet et Craboules). L'anomalie P4, identifiée sur le transect 2, pourrait être attribuée à un paléo-chenal. L'environnement sédimentaire décrit sur ce transect est assez différent des descriptions faites sur les deux autres.

Les cartes de conductivité électrique de l'EM38 et EM31 permettent d'identifier une anomalie de forme allongée (P7) avec une épaisseur de 2 m, présente en surface sur les sections électriques 9 et 10 (Figure 6b et 7). Ces dimensions ne semblent pas plaider pour un paléo-chenal. Elle est probablement associée à une dépression comblée avec des matériaux plus argileux, pouvant être des dépôts de crues de la Robine.

Le transect 3 (sections 6, 7 et 9) confirme la présence des milieux résistants composant l'ensemble E1 visible sur les transects 1 et 2 de l'Étang du Cercle (Figure 3 et 5). Cet ensemble E1 a été identifié comme une formation sédimentaire composée par des alluvions sableuses de l'ancienne plaine alluviale de l'Aude. Les formations plus conductrices N2 et N3 sont probablement associées à des formations alluviales de l'Étang du Cercle ou des vases lagunaires.

L'anomalie P5 sur la section 7 (Figure 5) semble se rapprocher de la zone très conductrice sur les cartes de conductivité (Figure 6). Cependant, il est difficile actuellement de confirmer ce rapprochement. Des prospections électromagnétiques sur la parcelle de la section 7 pourrait apporter

des informations pour comprendre la morphologie de cette anomalie car elle pourrait être associée à un paléo-chenal.

2 LA ZONE DE L'« AUTOROUTE »

La zone de l'autoroute est localisée à proximité du Canal de la Robine et à la limite sud de la ville de Narbonne, près de *La Languedocienne* (Figure 1). Cette zone présente un intérêt important car les parcelles sont accessibles et les possibilités de pouvoir localiser l'ancien cours de l'Aude sont fortes. Il existe en effet une contrainte géologique au tracé du cours d'eau : les reliefs des anciennes terrasses fluviales (terrasses de lunes) laissant un passage au paléo-chenal de seulement quelques centaines de mètres de large (centré sur le canal de la Robine).

Les prospections géophysiques se sont focalisées sur les parcelles entre les bras méandriformes du canal faisant la jonction entre la Robine et le Ruisseau du Veyret (lieu-dit du Fleisch), l'ancienne friche industrielle (près de la Z.A.C Bonne Source) et l'Égaciéral (Figure 8).

2.1 CARTE DE LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE APPARENTE

La carte de CEa au conductivimètre l'EM31 est présentée sur la Figure 8a. Des bandes plus résistantes (inférieurs à 50 mS/m) sont présentes sur les bords des petits canaux. Elles sont liées à des effets de drainage des parcelles qui induisent un rabattement de la nappe d'eau à proximité des canaux, d'où une diminution de la conductivité électrique (Camus, 2008 ; Camus et *al.*, 2011).

La carte de CEa met en avant deux milieux résistants caractérisés par les anomalies R1 et R2 et un milieu plus conducteur C1. Les milieux R1 et R2 présentent des conductivités inférieures à 50 mS/m et ils sont séparés par un milieu plus conducteur C1 (supérieur à 50 mS/m) et par l'anomalie P6-b (entre 50 et 70 mS/m). Cette dernière présente une morphologie de chenal avec une largeur de 35 m (plus faible distance entre R1 et R2). Elle pourrait être associée à un ancien cours de l'Aude.

Dans la zone B, des valeurs de forte conductivité électrique sont observables dans la petite parcelle plus au sud (supérieure à 100 mS/m). Un fort gradient de conductivité est donc présent avec les parcelles voisines qui possèdent une valeur moyenne entre 50 et 70 mS/m. Cette petite zone aux fortes conductivités correspond à une parcelle non-cultivée. Il s'agit d'une zone humide parcourue par plusieurs fossés.

L'anomalie P6 présente une anomalie conductrice en son centre qui possède une forme incurvée. Cette anomalie recoupe la section électrique 1 au niveau de la dépression conductrice. Cette anomalie pourrait donc être associée au tracé d'un paléo-chenal.

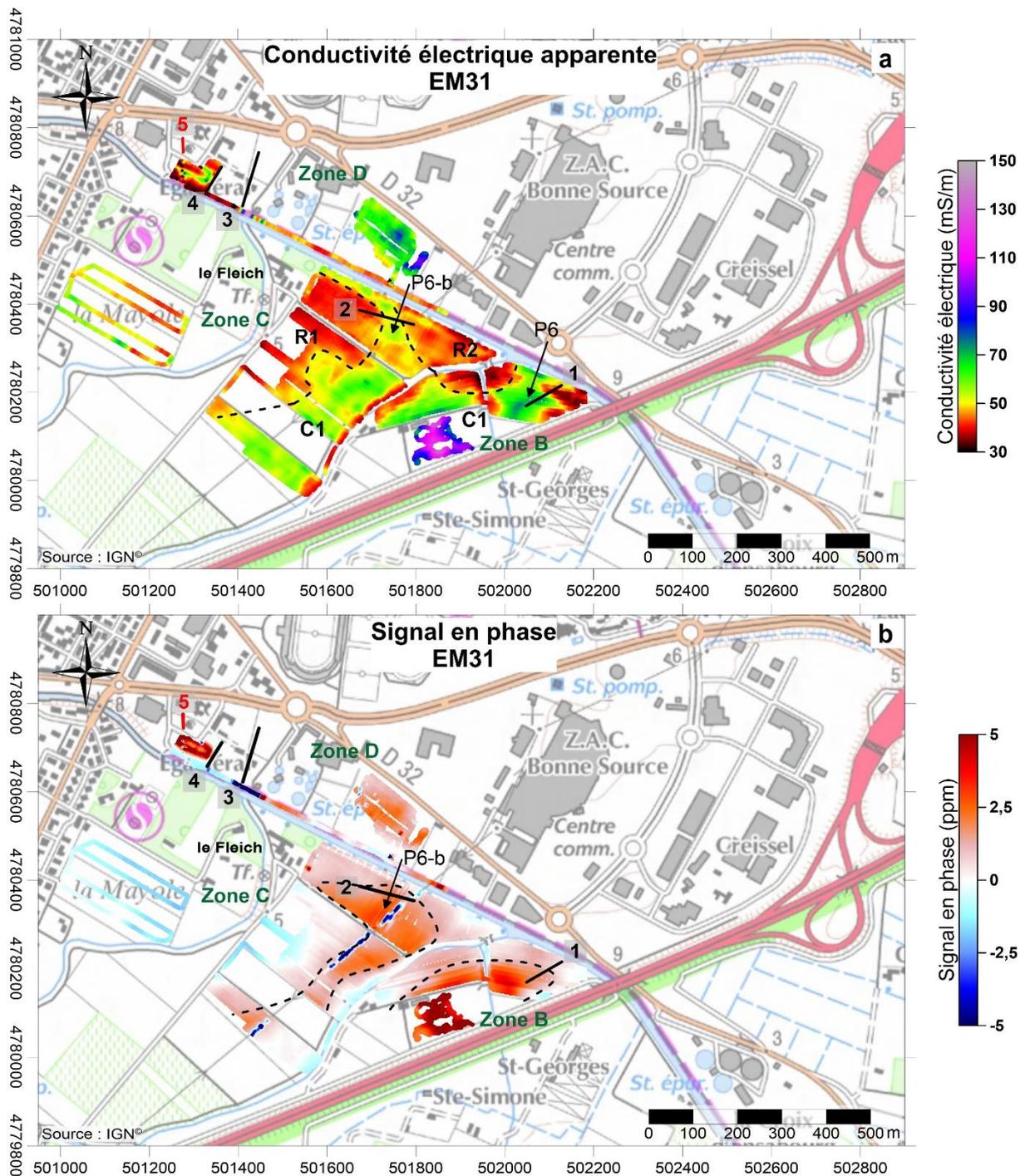


Figure 8 : Prospections électromagnétiques avec le conductivimètre EM31 dans la zone de l'autoroute. (a) Carte de la conductivité électrique apparente pour une profondeur d'investigation entre 1,5 à 5 m. (b) Carte du signal en phase.

Les zones prospectées sur la rive nord du Canal de la Robine (zone D, Figure 8a), au niveau de l'Égaciéral et de l'ancienne friche industrielle, sont difficilement exploitables. En effet, elles sont perturbées par des remblais et des réseaux électriques. La parcelle de la friche industrielle possède des conductivités proches de C1 mais ces variations peuvent être induites par des structures modernes.

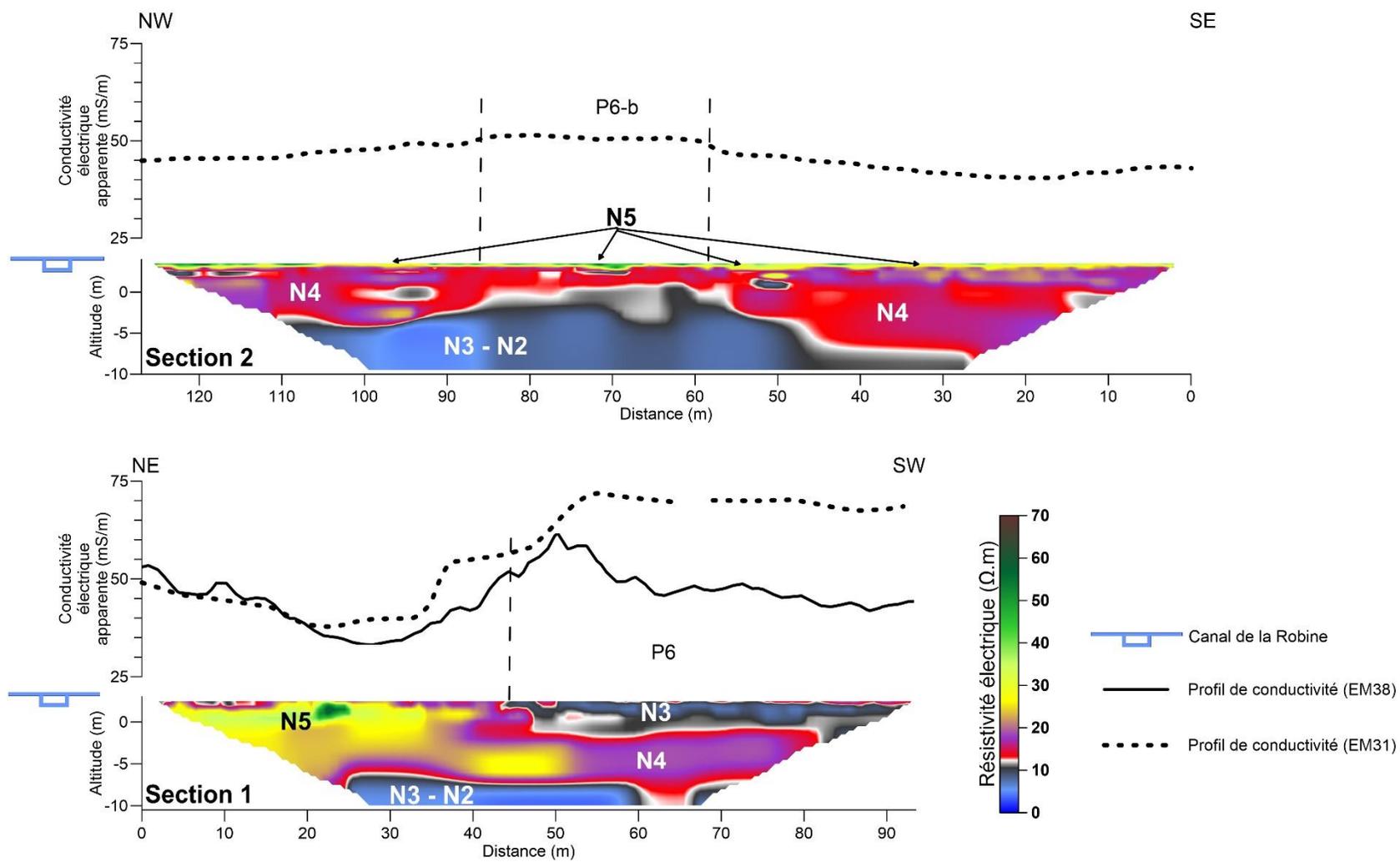


Figure 9 : Sections de résistivité électrique 1 et 2 réalisées dans la zone de l'autoroute.

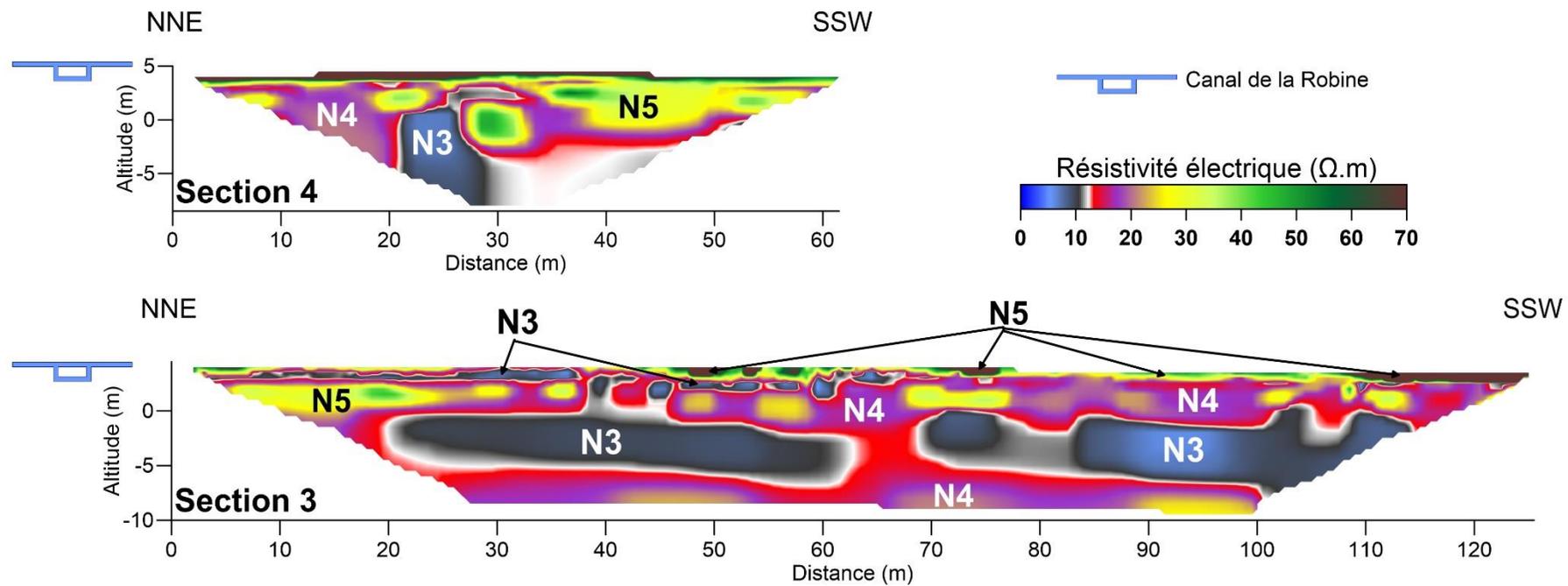


Figure 10 : Sections de résistivité électrique 3 et 4 réalisées dans la zone de l'autoroute.

2.2 CARTE DU SIGNAL EN PHASE

La carte du signal en phase est illustrée sur la Figure 8b. Elle met en avant deux zones présentant des valeurs élevées de ce signal qui semblent se corrélérer assez bien avec le milieu C1 caractérisé par des conductivités plus élevées. La superposition des deux cartes (conductivité et signal en phase, Figure 8) n'est pas parfaite mais reste cohérente. Les zones les plus conductrices de la zone de l'autoroute semblent être plus riches en matériaux argileux que les zones plus résistantes.

2.3 LES SECTIONS ÉLECTRIQUES

Quatre sections de résistivité électrique ont été réalisées dans la zone de l'autoroute. La section 1 est implantée au sud, près de l'autoroute, en travers de l'anomalie P6. La section 2 est localisée plus au nord, en travers de l'anomalie P6-b. Les sections 3 et 4 sont positionnées plus au nord (Figure 8a), à l'entrée de la ville, et perpendiculaire au Canal de la Robine. Leurs positions ont été choisies en fonction de l'accessibilité car elles sont en zone urbaine. De ce fait, elles sont positionnées en parallèle d'un chemin d'accès au Canal de la Robine (section 3) et d'un parking (section 4). Elles seront donc perturbées par des remblais modernes.

2.3.1 Les sections électriques 1 et 2

La section électrique 1, présentée sur la Figure 9, est positionnée en travers de la structure P6 et orientée NE-SW (Figure 8a). La première moitié de la section, proche de la Robine, est caractérisée par une formation résistante identifiée par le milieu N5, correspondant à des résistivités électriques comprises entre 20 et 50 $\Omega.m$. La seconde partie est composée par une dépression conductrice de 3 m d'épaisseur caractérisée par le milieu N3. Cette dépression repose sur un milieu N4 (entre 10 et 20 $\Omega.m$). Les deux milieux N4 et N5 composent ainsi une anomalie résistante sur-jacente à un milieu plus conducteur N3-N2 (entre 5 et 10 $\Omega.m$ pour N3 et 2,5 à 5 $\Omega.m$ pour N2).

La structure P6 est associée à la dépression caractérisée par le milieu N3 (Figure 9). Elle est donc localisée à la transition entre les milieux N5-N4 et N3. Le profil de conductivité de l'EM31 est associé à un fort gradient. La section 1 et le profil de l'EM31 montrent que la structure P6 semble bien être associée à l'anomalie conductrice de forme incurvée présente sur la carte de CEa (Figure 8a).

La partie est de la section 1, caractérisé par le milieu résistant N5 (Figure 9), correspond à la structure résistante localisée à l'est de la zone B sur la carte de CEa (Figure 8a). Par comparaison avec les sections électriques effectuées dans la zone de l'Étang du Cercle, les milieux supérieurs à 15 $\Omega.m$ avaient été interprétés comme pouvant être associés à des niveaux de sables. Avec la même interprétation, sur la section 1, les milieux N4 et N5 seraient des formations plus sableuses que les

milieux N3 et N2 (Figure 9). Ainsi, les zones résistantes sur la carte de CEa (inférieures à 50 mS/m) pourraient être des formations plus sableuses que les zones plus conductrices (Figure 8a).

La section 2 a été positionnée en travers de la structure P6-b (Figure 9), à 350 m plus au nord de la section 1. Cette section met en évidence une grande formation résistante continue composée par le milieu N4 sus-jacent au milieu N3-N2. Cette formation résistante a une épaisseur d'une dizaine de mètres dans sa partie est et d'environ 7 m dans sa partie ouest. La partie centrale de cette formation est plus réduite car elle est seulement de 2 à 4 m d'épaisseur. L'amincissement de cette formation est associé à une légère augmentation de la conductivité sur le profil de conductivité de l'EM31. Cet amincissement est donc associé à la structure conductrice P6-b identifiée sur la carte de CEa (Figure 8a). L'augmentation de la conductivité est donc liée au fait que le milieu N3-N2 est plus proche de la surface (entre 2 et 4 m, Figure 9). Ce serait vraisemblablement la profondeur d'apparition du milieu N3-N2 (ou l'amincissement du milieu N4) qui serait mise en évidence sur la carte de conductivité de l'EM31 (Figure 8a). De ce fait, la structure P6-b correspondrait à l'amincissement d'une grande formation résistante (plutôt sableuse), sur une largeur de 35 m, et orientée N-S, puis parallèle au canal de la Robine vers le nord (orientée NW-SE).

2.3.2 Les sections électriques 3 et 4

La section 3 est localisée à 450 m plus au nord de la section 2 et elle est sur la rive est de la Robine (Figure 8a). La section 3 Figure 10 présente une stratigraphie différente des milieux électriques de celle des sections 1 et 2. En effet, les mêmes milieux électriques sont présents mais possèdent des profondeurs d'apparition et des épaisseurs différentes.

Une couche très résistante en surface (milieu N5, supérieur à 40 Ω .m) correspond à des remblais modernes. Dans la partie est de la section, proche de la Robine, une fine couche conductrice est détectée sous les remblais modernes. Elle est caractérisée par le milieu N3 (environ 1 m d'épaisseur). Cette fine couche repose sur une formation plus résistante caractérisée par les milieux N5 à l'est (proche de la Robine) et N4 à l'ouest. Cette formation a une épaisseur plutôt homogène d'environ 3,5 à 4 m. Elle est sus-jacente à un milieu plus conducteur N3. Le long de cette « coupe », N3 a une épaisseur plutôt homogène. Un milieu plus résistant est présent à la base de la section. Il possède la même signature électrique que la formation résistante N4 en surface.

La côte d'apparition et de disparition de la formation résistante N4 présente en surface est similaire à la formation résistante aminci de la structure P6-b de la section 2 (Figure 9). Cependant, les signatures électriques ne sont pas exactement les mêmes, car sur la section 3 (Figure 10), elle possède un caractère plus hétérogène avec la présence de poches plus résistantes. Si ces deux entités géo-électriques correspondent au même corps sédimentaire, alors les variations de signature électrique traduisent des variations latérales de faciès.

La section 4 est localisée à 80 m au nord de la section 3 (Figure 10). Une couche très résistante est présente en surface et correspond à des remblais modernes. Cette section met en avant un milieu résistant N4 à l'est et un milieu encore plus résistant N5 à l'ouest. Ces milieux sont séparés par une structure plus conductrice au milieu de la section. Cette section présente une géométrie qui se rapproche de la section 3.

2.4 CONCLUSIONS

Les sections 1 et 2 présentent une géométrie semblable à l'ensemble des sections électriques effectuées dans les zones de Mandirac jusqu'à l'Étang du Cercle (Figure 1) : elles mettent en évidence un ensemble de milieux résistants reposant sur un milieu plus conducteur (inférieur à 5 Ω .m). L'ensemble résistant est interprété comme pouvant être des formations sédimentaires sableuses et fines associées à l'ancienne plaine alluviale de l'Aude. L'ensemble conducteur sous-jacent pourrait correspondre à des dépôts lagunaires fins. Ainsi, sur les sections 1 et 2 de la zone de l'autoroute, les milieux N4 et N5 pourraient être associés à des alluvions sableuses de l'Aude et le milieu N3-N2 comme des dépôts de lagune (Figure 9).

Cependant, les sections 3 et 4, et en particulier la section 3 (Figure 10), ne présentent pas cette morphologie. En effet, l'ensemble résistant se retrouve bien et il est caractérisé par un milieu N5 et N4 mais l'ensemble conducteur N3-N2 repose sur un niveau plus résistant N4. Cette géométrie est différente car ce niveau n'est pas visible sur toutes les autres sections de la zone de Mandirac jusqu'aux sections 1 et 2 de l'autoroute (Figure 1).

Annexe 3 : Carottages dans le secteur de Craboulette, delta de l'Aude : où est (sont) le(s) paléo-chenal(aux) de l'Aude ?

Par Clément Flaux

1 CONTEXTE

Le port de Narbonne est considéré comme le deuxième port de l'empire romain en Occident, après Ostie. Or, Narbonne se situant à une quinzaine de kilomètres de la côte et en arrière d'une mosaïque deltaïque de plaine alluviale, d'étangs et de cordons littoraux (Figure 1), la question du port antique de Narbonne comprend l'ensemble de cette vaste zone géographique et doit s'attacher, entre autres, à restituer une, ou plusieurs, routes fluvio-lagunaire permettant de relier Narbonne à la mer Méditerranée (Sanchez et Jézégou, 2011). Ainsi, depuis 2008 a été mis en oeuvre un programme de recherche impliquant la collaboration étroite d'archéologues, de géophysiciens et de géomorphologues, engagés dans une reconstitution de la géographie du système portuaire Narbonnais pendant l'Antiquité (*Projet Collectif de Recherche sur les Ports Antiques de Narbonne*, sous la direction de Corinne Sanchez, CNRS, UMR 5140).

Le tracé du paléo-chenal anthropisé de l'Aude, endigué et dont les berges peuvent être densément aménagées (occupation entre le 1^{er} et le 4^{ème} s. ap. J.-C.), est maintenant établi depuis son embouchure dans l'étang de Bages-Sigean, jusqu'à 1,7 km vers le nord, grâce à des prospections géophysiques qui ont été confirmées par des fouilles archéologiques et des carottages sédimentologiques. Le tracé du (des) paléo-chenal(aux) vers le nord jusque Narbonne demeure géographiquement inconnu et fait notamment l'objet de la thèse de Guillaume Bruniaux (Université de la Rochelle). Ainsi en 2015 et 2016, une série de cartes électromagnétiques et de sections de résistivité électrique a été réalisée depuis la paléo-embouchure jusqu'au pied de la cité de Narbonne, en suivant le tracé moderne du canal de la Robine, héritier au moins partiel d'un ancien cours de l'Aude. Les contrastes de résistivité du sous-sol, observés en plan ou en sections, permettent de mettre en évidence la présence de structures archéologiques ou géomorphologiques. Il n'existe cependant pas de corrélation directe entre telle structure et tel signal de résistivité électrique, ce dernier étant conditionné par d'autres facteurs, notamment la présence de nappes d'eaux souterraines de différente salinité. Les contrastes de résistivité électrique doivent donc faire l'objet de sondages archéologiques ou sédimentologiques. Le présent rapport décrit les 14 carottages ainsi que l'analyse bio-sédimentologique de l'un d'entre eux,

réalisés afin de tester la présence d'un paléo-chenal identifié par prospection géophysique dans le secteur de la Craboulette (Figure 1).

2 SITE ET MÉTHODES

Le site investigué se situe à proximité du lieu-dit Craboulette, environ 4 km au nord de la paléo-embouchure de l'Aude (Figure 1). Il s'agit de 2 parcelles parallèles de ~ 90 x 250 m. de côté, entourées par des fossés. La parcelle ouest se situe en rive gauche du canal de la Robine. La Figure 2 restitue les prospections géophysiques effectuées en 2015 qui ont permis de réaliser une carte de conductivité magnétique et deux sections de résistivité électrique (Bruniaux *et al.*, 2015). La carte de conductivité met en évidence la structure P1, très conductrice (supérieure à 70 mS/m), dont le tracé méandrique peut correspondre à un chenal de direction N-S et de 46 m de large. Les sections de résistivité 1 et 2 ont été réalisées perpendiculairement au chenal. La section 1 paraît confirmer la présence d'un chenal, également plus conducteur, plus étroit (28 m) que d'après la carte de conductivité et d'une profondeur de 4,2 m. Le chenal est en revanche absent de la section 2, peut-être en raison d'un effet de drainage dû à la proximité du canal de la Robine (Bruniaux *et al.*, 2015).

Nous avons réalisé 14 carottages le long d'un profil perpendiculaire à l'axe moderne de la Robine, profil qui recoupe l'axe nord-sud du paléo-chenal détecté par la carte de conductivité et confirmé par la section de résistivité 1 (Figure 2). Les carottages ont été réalisés au moyen du carottier à percussion (type Cobra TT) du laboratoire de sédimentologie de l'UMR 5140. La profondeur atteinte varie entre 5 et 10 m sous la surface. La position des carottages CRA-1 à CRA-8 a été mesurée par GPS, celle des carottages CRA-9 à CRA-12 par triangulation à partir des précédents (annexe 1). L'altitude relative de chaque carottage a été mesurée au moyen d'un niveau optique. Les séquences sédimentaires ont été décrites directement sur le terrain (annexe 1). Les séquences CRA-1, CRA-2 et CRA-3 ont fait l'objet d'un échantillonnage (1 échantillon de 5 cm d'épaisseur chaque 10 cm). Le carottage CRA-2 a été triplé (CRA-2' et CRA-2'') afin de doubler et affiner l'échantillonnage de cette séquence (1 échantillon de 5 cm d'épaisseur chaque 5 cm), afin également de conserver des archives sédimentaires pour d'éventuelles analyses complémentaires et postérieures.

La séquence CRA-2 a fait l'objet d'une analyse approfondie afin de restituer les environnements de dépôts des principaux faciès sédimentaires, par l'analyse de la taille des grains et des assemblages biologiques fossiles. Ces analyses ont été effectuées au laboratoire de sédimentologie du CEREGE (Dir. Doriane Delanghe). Le tamisage humide a permis de quantifier et d'extraire le ballast (> 2 mm) et la fraction sableuse (0,063-2 mm) de 46 échantillons. Les fractions extraites sont observées sous une loupe binoculaire qui permet également de photographier les différents faciès et les assemblages faunistiques. La macrofaune et la microfaune ont été déterminées en collaboration avec Tiphaine Salel (Université de Montpellier, UMR 5140) et Nick Marriner (CNRS UMR 6249).

Cependant, la macrofaune demeure peu abondante dans l'ensemble des séquences et la microfaune a été extraite et étudiée seulement sur quelques échantillons, étant donné le temps imparti pour la réalisation de cette étude. L'interprétation écologique des assemblages décrits doit donc être considérée comme indicative.

La distribution granulométrique a été mesurée sur 46 échantillons au moyen du granulomètre laser Beckman Coulter LS 13 320 dans une gamme de 0,04 à 2000 μm divisée en 132 fractions. Les données brutes sont restituées dans l'annexe 2. La comparaison des méthodes mécanique et laser (Figure 4) montrent très nettement que les fines sont sur représentées dans la première et que les sables le sont dans la seconde. L'indice de tri (Figure 4) a été calculé d'après Folk (1966). Nous avons également entrepris la mesure des éléments majeurs et traces, effectuée sur sédiment brut par la méthode de spectrométrie de fluorescence X (ED-XRF) au moyen du spectromètre Delta InnovX et de la station de travail A-020-D, en collaboration avec Jean-Philippe Degeai (CNRS, UMR 5140). 52 échantillons prélevés sur la séquence CRA-2' entre 0 et -3 m et 33 échantillons prélevés sur la séquence CRA-2'' entre -3 et -5 m ont été analysés. L'ensemble des données est restitué dans l'annexe 3, mais nous nous focalisons dans ce rapport sur la teneur en plomb. L'objectif était de fournir un cadre chronologique aux différentes phases de dépôts de la séquence Cra-2. En effet les travaux de thèses en cours de Tiphaine Salel et Camille Faisse (Université de Montpellier, UMR 5140) montrent que la teneur en plomb mesurée dans une dizaine de séquences sédimentaires du delta de l'Aude est caractérisée par deux hausses significatives de la quantité de plomb dans le sédiment, respectivement attribués au début de l'époque romaine et autour de l'an 1000 par une chronologie radiocarbone.

3 RÉSULTATS

3.1 DESCRIPTION BIO-SÉDIMENTOLOGIQUE DE LA SÉQUENCE CRA-2

La séquence Cra-2 mesure six mètres d'épaisseur et se situe au cœur du transect de carottages (Figure 2). Nous avons identifié six principaux faciès sédimentaires, décrits ci-dessous du bas vers le haut (Figure 3).

3.1.1 Faciès 1 : sables limoneux gris

Cette unité est observée entre -4,75 et -6 m. de profondeur sous la surface. Il s'agit de sables gris, comprenant quelques macro-restes organiques conservés ainsi que des fragments coquilliers de taille sableuse. Ces sables ont un diamètre moyen compris entre 200 et 340 μm . Entre -5,2 et -5,6 m, le faciès est caractérisé par le dépôt de passées limono-sableuses grises, d'épaisseur millimétrique à centimétrique, intercalées par des dépôts sableux gris. La distribution granulométrique dans ce niveau est pluri-modale et l'indice de tri est par conséquent mauvais (Figure 4). Les grains de sables de cette

unité sont essentiellement quartzeux et présente une surface sub-anguleuse à subarrondis (Figure 5). Un fragment de bois bien conservé de 4-5 cm de diamètre a été extrait à -5,4 m sous la surface (Figure 5). Les fragments coquilliers sableux sont indéterminés mais quelques ostracodes ont été observés dans un échantillon prélevé à -5,3 m. Les espèces identifiées appartiennent à l'écologie lagunaire (Figure 6).

3.1.2 Faciès 2 : vases bleutées

Cette seconde unité est observée entre -4,23 et -4,75 m sous la surface (Figure 3) et est caractérisée par des vases de teinte gris bleuté. Quelques macro-restes végétaux sont bien conservés dans le sédiment. Une structure laminée fantomatique est observée entre -4,45 et -4,75 m. Nous n'avons pas retrouvé de restes coquilliers dans ce faciès. Le sommet de l'unité présente un contact ondulante avec le dépôt sus-jacent. L'analyse granulométrique laser montre que ce dépôt est dominé par les limons, auxquels s'adjoignent des fractions variables de sables et d'argiles (Figure 4). La distribution granulométrique mais parfois en évidence deux modes, ce qui explique un indice de tri modéré à mauvais. Le grain moyen passe de 40 μm dans le bas du faciès à 13 μm vers le haut.

3.1.3 Faciès 3 : Sables graveleux

La troisième unité marque une rupture avec le dépôt de matériaux fins précédents, marquée d'une part par l'interface ondulante entre les deux dépôts, très probablement d'origine érosive, d'autre part par la texture du faciès 3, caractérisé par l'apparition d'une fraction graveleuse (> 2 mm), qui comprend entre 2 et 28 % du sédiment total. Les graviers sont très arrondis et on observe également quelques galets roulés (> 2 cm de diamètre ; Figure 5). Ce ballast est accompagné par des sables moyens et grossiers. Le grain moyen varie entre 400 et 500 μm et l'indice de tri est modéré (Figure 4). On observe entre -3,95 et -4 m une passée plus riche en éléments fins, avec un grain moyen de 185 micromètres et un indice de tri mauvais. La macrofaune est relativement abondante dans quelques échantillons, notamment entre -4,2 et -3,8 m, où elle est représentée par un assemblage relativement diversifié comprenant les bivalves *Loripes lacteus* et *Cerastoderma glaucum* qui dominent l'assemblage, accompagné de *Mytilus* sp. et *Macoma tenuis*, et les gastéropodes *Hydrobia* sp., *Rissoa venusta*, *Bittium* sp., *Pirenella conica*, *Paludinella sicana* (Figure 7). Un échantillon prélevé entre -3,81 et -3,86 m a également révélé la présence d'un assemblage micro-faunistique comprenant les ostracodes *Xestoleberis* sp., *Cyprideis torosa* et *Loxococoncha rhomboidea*, et les foraminifères *Elphidium* sp. et *Ammonia beccarii* (Figure 8).

3.1.4 Faciès 4 : Limons argileux

L'unité suivante marque à nouveau une rupture très franche des conditions de sédimentation. Le faciès 4, observé entre -2,55 et -3,4 m présente en effet des vases grises et compactes, parsemées de

tâches orangées d'oxydation (Figure 3). On observe des vestiges d'une structure laminée millimétrique marquée par des lamines plus organiques ou plus oxydées. De rares fragments coquilliers de taille sableuse sont observés sur le terrain. Après tamisage cependant, on observe quelques gastéropodes non déterminés (Figure 9E-F). Ce dépôt est largement dominé par les limons (75 %) accompagné d'une fraction argileuse (25 %). L'analyse granulométrique mesure un grain moyen compris entre 8 et 12 micromètres. L'indice de tri est modéré. La distribution granulométrique des sept échantillons extraits de ce faciès est remarquablement similaire, témoignant de l'homogénéité de ce dépôt (Figure 4). La fraction sableuse est quasi inexistante, représentée par des grains de sables très fins, subanguleux parfois tâchés d'une teinte orangée (Figure 5).

3.1.5 Faciès 5 : Sables grossiers

Ce faciès se trouve entre -2,55 et -1,5 m sous la surface et marque une nouvelle rupture de la texture. Le dépôt est composé de sables moyens à grossiers, excepté entre -1,8 et -2 m où un dépôt majoritairement limono-sableux se met en place (Figure 3). La distribution granulométrique des sables présente une courbe très accusée qui traduit un processus de tri, qualifié de modérément bon (Figure 4). Le grain moyen est compris entre 450 et 780 μm . Les grains de sables ont une surface subarrondis et on distingue très clairement entre -2 et -2,25 leur aspect lavé, excepté entre -1,8 et -2 où des conditions plus calmes permettent le dépôt d'une fraction limoneuse dominante. Nous avons observé quelques gastéropodes que nous ne sommes pas parvenus à déterminer (Figure 9D).

Faciès 6 : Limons sablo-argileux

Ce dernier dépôt, observé entre -1,5 et la surface, est caractérisé par un dépôt limoneux brun à brun orangé très massif, homogène, très sec et très compact. L'altitude du toit de la nappe phréatique dans ce carottage a d'ailleurs été mesurée à -1,55 m sous la surface (Figure 3). L'analyse granulométrique confirme la prédominance des limons, accompagnés d'une fraction persistente d'argiles (Ca. 15 %) et de sables fins dont l'abondance décroît vers le haut du dépôt. Le grain moyen varie entre 15 et 45 μm , mais l'indice de tri est mauvais (Figure 4).

3.2 IMAGE CM

L'image CM a été développée par Passega (1964), dans le but d'interpréter des données granulométriques et différencier les dépôts issus de différents modes de transport en milieu fluviatile et marin (suspensions pélagique, uniforme et gradée, et roulage). Elle permet de visualiser sur un graphique la totalité des échantillons, qui forme un nuage de points, distribués selon deux paramètres : M, la médiane granulométrique et C, le premier percentile grossier, soit la taille du plus gros élément d'un sédiment. Ce dernier paramètre représente la limite de compétence du courant qui a déposé le sédiment. Toutefois, de nombreux paramètres spécifiques à chaque cours d'eau (énergie disponible, largeur et

penne de la plaine alluviale, style fluvial, sédiments disponibles, etc..) influencent les caractéristiques de l'image CM et il n'existe pas d'image universelle transposable à tous les environnements fluviaux (Bravard et Peiry, 1999).

Les données CM de 46 échantillons prélevés le long du carottage CRA-2 (Figure 10) viendront compléter l'image CM développée pour les sédiments pro-deltaïques et deltaïques déposés par l'Aude au cours de l'Holocène (thèses en cours de Tiphaine Salel et Camille Faïsse, Université de Montpellier). L'image CM du delta de l'Aude permettra de définir les seuils granulométriques de référence du transport en suspension pélagique, uniforme, gradée ou par roulage, qui faciliteront l'interprétation des futures données granulométriques acquises dans le delta. Dans le cas de Cra-2, le nombre d'échantillons est trop faible pour définir des seuils précis, caractérisés par des ruptures de pentes dans le nuage des échantillons sur l'image CM, distribués selon différents segments (Figure 10). Cependant, la taille minimum des grains transportés par roulage (Indice Cr dans l'image CM), caractérisé par les faciès sablo-graveleux et sableux 3 et 5, peut être estimée à 1 mm. À l'opposé sur l'image CM, le transport par suspension pélagique correspond au faciès limono-argileux 4. Entre ces deux extrêmes se trouvent les faciès 1, 2 et 6, caractérisé par un transport en suspension uniforme à gradée (au sein de la colonne d'eau). Les faciès 2 et 6, dont les fréquences granulométriques s'étalent des argiles aux sables, résultent vraisemblablement du mélange de deux sources de transport, ce qui explique leur translation vers la gauche (médiane plus petite et C élevé). Cette contrainte est une limite de l'application de l'image CM de Passega, établie sur des dépôts de surface, à des séquences sédimentaires fossiles, notamment lorsque la résolution d'échantillonnage est plus grossière que l'épaisseur des dépôts individuels correspondant à un événement de transport, ou parce que des processus post-dépositionnels ont mélangé le sédiment (compactage, bioturbation, etc..).

3.3 TENEUR EN PLOMB ET ÉLÉMENTS MAJEURS

Nous présentons dans la Figure 11 la teneur en plomb mesurée le long du profil de Cra-2' et Cra-2". Les teneurs sont relativement faibles, elles oscillent entre 10 et 30 ppm. Deux phases d'enrichissement de la teneur en plomb sont principalement observées entre -3,4 et -2,5 m et entre -0,25 m et la surface. Cet enrichissement correspond aux faciès 4 et 6, caractérisées par leur texture limono-argileuse.

La Figure 12 présente, en parallèle du plomb, les teneurs en différents éléments majeurs et métalliques présents dans le sédiment. Celui-ci est dominé par la silice et le calcium, correspondant respectivement aux minéraux silicatés et carbonatés. L'observation de la fraction sableuse sous loupe binoculaire a confirmé la dominance du quartz et minéraux ou roches silicatées. Si et Ca sont anti-corrélés ($r^2 = 0,65$), traduisant que l'abondance de l'un est directement reliée à celle de l'autre. Les éléments Fer, Potassium, Titane et Manganèse suivent Si et Ca en terme d'abondance et leurs variations

respectives sont bien corrélées entre elles (Figure 12). Ces variations peuvent également nettement être associées aux variations de texture du sédiment : les faciès limono-argileux sont caractérisés par une augmentation de la teneur en Fe et K, probablement en lien avec l'abondance de minéraux argileux, tandis qu'ils diminuent dans les faciès sableux à sablo-graveleux, dominés par le quartz. Grains moyens et teneur en fer présente par exemple un coefficient de corrélation linéaire de $r_2 = 0,55$.

Le plomb, qui est lui-même corrélé au Fe ($r_2 = 0,49$), présente le même profil de variation que d'autres métaux tel que le cobalt, l'arsenic et le zinc (Figure 12). Ces données suggèrent que la teneur en plomb dans le profil Cra-2 ne peut être utilisée pour mettre en évidence une paléo-pollution car ses variations apparaissent clairement affiliées aux conditions de dépôts et vraisemblablement à la teneur en minéraux argileux, ceux-ci ayant une capacité d'adsorption des éléments métalliques importante.

4 SECTION SÉDIMENTAIRE DES DOUZE CAROTTAGES : DEUX PALÉO-CHENAUX

La **figure 13** propose un essai de restitution de la géométrie des principaux faciès sédimentaires détaillés dans l'étude de la colonne Cra-2 et corrélés aux séquences des autres carottages. Nous mettons ainsi en évidence six principales phases et environnements de dépôts qui se sont succédé dans le secteur de Craboulette au cœur du delta de l'Aude.

4.1 PHASE 1

Cette première phase comprend la base des séquences investiguées, observées dès -9 m dans les carottages Cra-1 et Cra-10 et dont le toit se situe entre -5 m (Cra-1) et -4,4 m (Cra-2). Cette phase est caractérisée par l'alternance millimétrique à décimétrique de dépôts de vases et de sables fins limoneux, de couleur gris foncé, contenant de rares fragments coquilliers de taille sableuse (indéterminés) et ponctuellement des restes organiques bien conservés. Dans les carottages Cra-1, Cra-2, Cra-4, Cra-5, Cra-6 et Cra-11, on observe, au sommet de cette première phase, le dépôt de vases gris bleuté contenant de nombreux macro-restes végétaux fibreux bien conservés. Dans le carottage Cra-2, cette première phase comprend les faciès 1 et 2.

Très peu de macro-faune a été observée dans ces dépôts. On note cependant la présence de *Cerastoderma sp.* et *Loripes sp.* dans la séquence Cra-9 vers -6,7 m. Dans la séquence Cra-2, quelques ostracodes, notamment *Cyprideis torosa*, ont été prélevés à -5,3 m (Figure 6). Cette faune est typique des milieux lagunaires et sa très faible abondance, ainsi que la diversité faunistique très faible du faciès 1, traduisent généralement un milieu lagunaire confiné (c'est à dire dont les eaux sont peu renouvelées par les eaux marines ; Guelorget et Perthuisot, 1983). La couleur gris foncé qui prend une teinte bleutée vers le sommet du dépôt de cette première phase, de même que la bonne préservation de macro-restes organiques, traduit un milieu réducteur souvent observé sur les fonds lagunaires, comme c'est le cas

actuellement dans le nord de l'étang de Bages (anoxie souvent liée à l'eutrophisation). La texture des dépôts, oscillant entre limons argileux et sables fins, correspond à un milieu de dépôt sub-aquatique respectivement caractérisé par un transport pélagique à un transport en suspension. Le premier type de sédimentation est actuellement présent dans l'étang de Bages-Sigean, notamment dans les secteurs abrités au nord (anse de Galère) et sur la façade occidentale, sous le vent, où se dépose des sédiments largement dominés par les fines (> 70 %, Ifremer, 2002). Le second type de sédimentation, dominé par les sables, est observé actuellement sur la façade orientale de l'étang de Bages-Sigean, où les courants générés par les vents dominants de secteur nord-ouest sont supérieurs. La phase 1 présente donc un environnement lagunaire relativement confiné où alternent, dans le secteur de la Craboulette, des périodes d'eaux stagnantes et des périodes où les fonds sont parcourus par des courants.

4.2 PHASE 2

La seconde phase est caractérisée par le dépôt de sables fins coquilliers. Si dans la séquence Cra-2 ce faciès a été observé entre -4,17 et -4,23 m de profondeur et associé au faciès 3, il est en revanche mieux développé dans d'autres séquences, atteignant jusqu'à 0,7 m d'épaisseur dans Cra-1 (Figure 13). Ce dépôt est caractérisé par la présence d'une composante macro-faunistique bien conservée. On observe la présence dominante de *Loripes lacteus* et *Cerastoderma glaucum*. De façon plus accessoire mais néanmoins récurrente se signale la présence de *Bittium sp.*, *Hydrobia sp.*, *Nassarius sp.*, et *Mytilus sp.* Par rapport à l'assemblage déposé durant la phase 1, celui-ci est plus abondant et plus diversifié. Il témoigne d'un environnement moins confiné et plus ouvert sur les influences marines, c'est à dire en terme géographique d'un environnement lagunaire connecté de façon permanente à la mer permettant un renouvellement fréquent des eaux de l'étang (Guelorget et Perthuisot, 1983).

4.3 PHASE 3

Cette troisième phase se caractérise par l'apparition d'une composante sablo-graveleuse, composée de sables moyens à grossiers sub-émoussés et de graviers et quelques galets bien roulés (faciès 3 de la séquence Cra-2 ; Figure 5). Ce faciès a été observé, d'ouest en est, dans les carottages Cra-5, Cra-2, Cra-6, Cra-7, Cra-8, Cra-1 et Cra-10. Du point de vue granulométrique, la présence de sables grossiers et de graviers roulés implique un mode de transport dynamique par roulement (Figure 10). Si des cordons de galets ont été décrits dans la séquence tardi-holocène du rivage oriental de l'anse de Galère (Carayon et Flaux, 2015), ou sont actuellement visibles à l'extrémité nord-est de l'île de la Planasse et à l'extrémité sud-ouest de l'île Saint-Martin, ceux-ci sont d'un part bien plus grossier et se trouvent toujours en connexion avec leur source composée par des terrasses fluviales pléistocènes. Dans le delta holocène de l'Aude en revanche, la présence de sables grossiers graveleux et de quelques galets arrondis, impliquent un transport par roulement sur le fond d'un paléo-chenal de l'Aude. Le sommet ondulante de ce

dépôt pourrait correspondre à des rides de fond de chenal. Ce faciès observé entre Cra-5 et Cra-10, et suggéré dans Cra-11 par la présence d'un unique gravier arrondi à -3,7 m, traduit donc la mise en place d'un paléo-chenal, d'au moins 75 à 100 m de large, et qui a probablement érodé une partie des dépôts lagunaires sous-jacents. Du point de vue macro-faunistique, ce faciès est caractérisé par l'abondance relative des bivalves *Loripes lacteus* et *Cerastoderma glaucum* qui dominent l'assemblage, accompagné de *Mytilus sp.* et *Macoma tenuis*, et les gastéropodes *Hydrobia sp.*, *Rissoa venusta*, *Bittium sp.*, *Pirenella conica*, *Paludinella sicana* (Figure 7). Du point de vue micro-faunistique, ce faciès est caractérisé dans la séquence Cra-2 par l'association des ostracodes *Xestoleberis sp.*, *Cyprideis torosa* et *Loxocoelha rhomboidea*, et les foraminifères *Elphidium sp.* et *Ammonia beccarii* (Figure 8). Par comparaison avec les assemblages d'ostracodes actuels à sub-actuels récoltés dans les sédiments superficiels des étangs Narbonnais, le groupe observé dans Cra-2 est similaire à celui observé dans les étangs de Sigean et de l'Ayrolle, directement connecté à la mer par les graus de Port-la-Nouvelle et de la Vieille-Nouvelle, respectivement (Salel et al., in press). Ces données biologiques traduisent un milieu lagunaire ouvert sur la mer. La combinaison des données granulométriques et faunistiques suggèrent que le dépôt de la phase 3 correspond à une embouchure de l'Aude dans l'étang de Bages-Sigean.

4.4 PHASE 4

Le dépôt de fond de chenal précédent est recouvert par un faciès de vases homogènes, déposé sur 1 à 2 m d'épaisseur, gris clair à brun gris et parsemé de tâches d'oxydation et de rares traces de matières organiques. La granulométrie de ce faciès est très homogène, dominé par les limons accompagnés d'environ 25 % d'argiles. Dans le diagramme de Passega, les échantillons correspondent à un mode de transport pélagique, c'est à dire un environnement de décantation (Figure 10). Par rapport au dépôt de fond de chenal actif sous-jacent, la phase 4 dénote une nappe d'eau stagnante, qui peut correspondre au comblement du chenal devenu inactif (bras mort) et déconnecté du chenal actif qui a migré latéralement à la fin de la phase 3. Les traces d'oxydation qui parsèment ce dépôt de façon systématique peuvent correspondre à l'assèchement chronique (estival ?) de ce bras mort. La séquence Cra-3 située à l'ouest du transect n'a pas enregistré ce faciès de décantation, ni le dépôt de chenal actif précédent, mais une séquence d'alternances de dépôts de limons argileux et de sables fins gris foncés, relativement pauvre en faune et contenant quelques restes organiques bien conservés, faciès similaire aux phases lagunaires 1 et 2. Ces observations suggèrent que le chenal a incisé des dépôts lagunaires conservés dans la séquence Cra-3. Coté est en revanche, nous ne sommes pas parvenus à distinguer le bord du chenal, son colmatage limono-argileux s'insérant dans un encaissant de même nature sédimentologique.

4.5 PHASE 5

La phase suivante est à nouveau caractérisée par un nouveau changement brutal de la texture, avec le dépôt de sables moyens à grossiers bien roulés, parfois entrecoupés de niveaux limono sableux. Ce dépôt globalement grossier est observé dans les carottages Cra-5, Cra-2, Cra-6, Cra-7, Cra-8, Cra-1, ainsi que Cra-9. Certains niveaux de sables grossiers apparaissent sur le terrain bien « lavés », c'est à dire sans composante fine. Cela est observé dans le faciès 5 de la séquence Cra-2 entre -2 et -2,25 m, où l'indice de tri mesuré dans un échantillon de ce niveau est qualifié de bon. Le diamètre moyen est mesuré entre 450 et 800 μm . D'après le diagramme de Passega, ce dépôt grossier implique un mode de transport par roulage. Ce faciès trié, roulé et lavé met une évidence dans le secteur de Craboulette un nouveau chenal, inscrit d'ouest en est entre CRA-4 et CRA-10, soit d'une largeur minimum d'environ 60 m. À nouveau il demeure difficile d'établir les bords de ce chenal.

4.6 PHASE 6

La sixième et dernière phase de sédimentation correspond à un dépôt de 1,5 à 2 m d'épaisseur dont la surface est remarquablement plane (Figure 13). Le dépôt est composé très majoritairement de limons bruns compacts et très homogène, parfois légèrement enrichi en sables fins ou en argiles selon les séquences. L'unité se trouve majoritairement au-dessus de la nappe phréatique. D'après l'analyse granulométrique effectuée sur la séquence Cra-2, le grain médian se trouve entre 10 et 25 μm , mais la gamme s'étend entre 0,2 et 300 μm et le sédiment est mal trié. Le diagramme de Passega indique un mode de transport par suspension. Quelques tâches d'oxydation et la couleur orangée de ce faciès suggère que le dépôt est fréquemment en conditions d'exondation, comme c'est le cas actuellement. Un faciès très similaire a été observé sur les berges de l'actuel chenal de l'Aude (section AUD-1, cf. annexe 1). Ce faciès correspond à des dépôts de débordement dans la plaine d'inondation, non plus de l'Aude mais probablement du canal de la Robine.

Quelques fragments de tuiles sont observés dans Cra-1 (-0,8 m), Cra-2' (-0,25 m) et Cra-7 (-0,3 m), appartenant peut-être à un, ou plusieurs, anciens drains enterrés.

5 CONCLUSION

La réalisation de 14 carottages le long d'un transect perpendiculaire à l'actuel cours de la robine dans le delta de l'Aude, dans le secteur de la Craboulette où des données géophysiques suggéraient la présence d'un paléo-chenal, a permis de restituer l'histoire morpho-sédimentaire suivante :

1. Sédimentation dans un environnement lagunaire partiellement confiné (-9 jusqu'à environ -4,5 m sous la surface).
2. Sédimentation dans un environnement lagunaire ouvert aux conditions marines.

3. Mise en place d'une embouchure de l'Aude dans l'étang de Bages-Sigean qui traduit la progradation du delta. Le dépôt sablo-graveleux de fond de chenal se situe entre -4,5 et -3,6 m et est bien marqué sur une largeur d'environ 75 m.

4. Défluviation du chenal et colmatage partiel du bras mort.

5. Mise en place d'un second paléo-chenal à l'emplacement de l'ancien en cours de comblement, probablement dans le contexte d'une crue de l'Aude. Le dépôt de sables moyens à grossiers sur le fond de ce chenal se situe entre -2,75 et -1,6 m et est bien marqué sur une largeur d'environ 60 m.

6. Nouvelle défluviation et dépôt de plaine d'inondation, vraisemblablement en relation avec l'activité du canal de la Robine. Mise en culture du secteur.

Cette restitution a bien entendu valeur locale. En complément des thèses en cours de Tiphaine Salel et Camille Fäisse, qui portent sur la paléo-géographie du delta de l'Aude au cours de l'Holocène, les données sédimentologiques de la Craboulette apportent un nouveau jalon à la compréhension de l'évolution du delta de l'Aude. La comparaison avec les données géophysiques (conductivité et résistivité électrique et pénétrométrie) obtenues sur ce même site lors des campagnes de 2015 et 2016 sera présentée dans le rapport de Guillaume Bruniaux et collaborateurs.

6 REMERCIEMENTS

Tout d'abord je remercie Corinne Sanchez, archéologue et directrice de l'ensemble du projet, pour le renouvellement de sa confiance. Merci à Guillaume Bruniaux, Adrien Camus et Vivien Mathé, géophysiciens, pour leur esprit de collaboration. Je remercie également Doriane Delanghe, directrice du laboratoire de sédimentologie du CEREGE (CNRS UMR 7730, Aix-en-Provence), Jean-Philippe Degeai et Benoît Devillers, directeurs du laboratoire de sédimentologie de Lattes (CNRS UMR 5140), pour m'avoir accueilli dans leurs laboratoires respectifs.

Enfin, un grand merci à l'équipe d'étudiants fouilleurs bénévoles, à Florian Yung, Tiphaine Salel et Camille Fäisse, géomorphologues, ainsi qu'à Annick et Louis Flaux, mes parents, pour leur motivation et leur précieuse aide sur le terrain lors de la réalisation des carottages.

7 RÉFÉRENCES

Bruniaux et al. (2015) : G. Bruniaux, V. Mathé, A. Camus, C. Fäisse, 2015. Résultats des prospections géophysiques effectuées pour la recherche du paléo-chenal de l'Aude du grand- Castélou à Narbonne. Rapport d'étude, Université la Rochelle – CNRS UMR 7266, 41 p.

Carayon et Flaux (2015) : Carayon N., Flaux C., 2015. Le vivier augustéen du lac-de-Capelles à Port-la-nautique. Actes du colloque Les ports dans l'espace méditerranéen antique, Montpellier, à paraître.

Folk, 1966: Folk, R.L., 1966. A review of grain-size parameters. *Sedimentology* 6, 73-93.

Guelorget et Perthuisot (1983) : O. Guelorget, J.-P. Perthuisot J.-P. (1983) – *Le domaine paralique. Expressions géologiques, biologiques et économiques du confinement*. Travaux du laboratoire de Géologie, Ecole Normale Supérieure Paris, 16, 1-136.

Ifremer, 2002 : *Réseau de Suivi Lagunaire du Languedoc-Roussillon : Bilan des résultats 2001*. Rapport RSL-02/2002, IFREMER, 2002, 366 p.

Salel et al., sous presse : T. Salel, H. Bruneton, D. Lefevre, sous presse. Ostracods and environmental variability in lagoons and deltas along the north-western Mediterranean coast (Gulf of Lions, France and Ebro delta, Spain). *Revue de micropaléontologie*. Sous presse.

Sanchez et Jézégou (2011) : Sanchez C., Jézégou M.-P. (eds), *Espaces littoraux et zones portuaires de Narbonne et sa région dans l'Antiquité*, Monographies d'Archéologie Méditerranéennes 28, pp. 41-66.

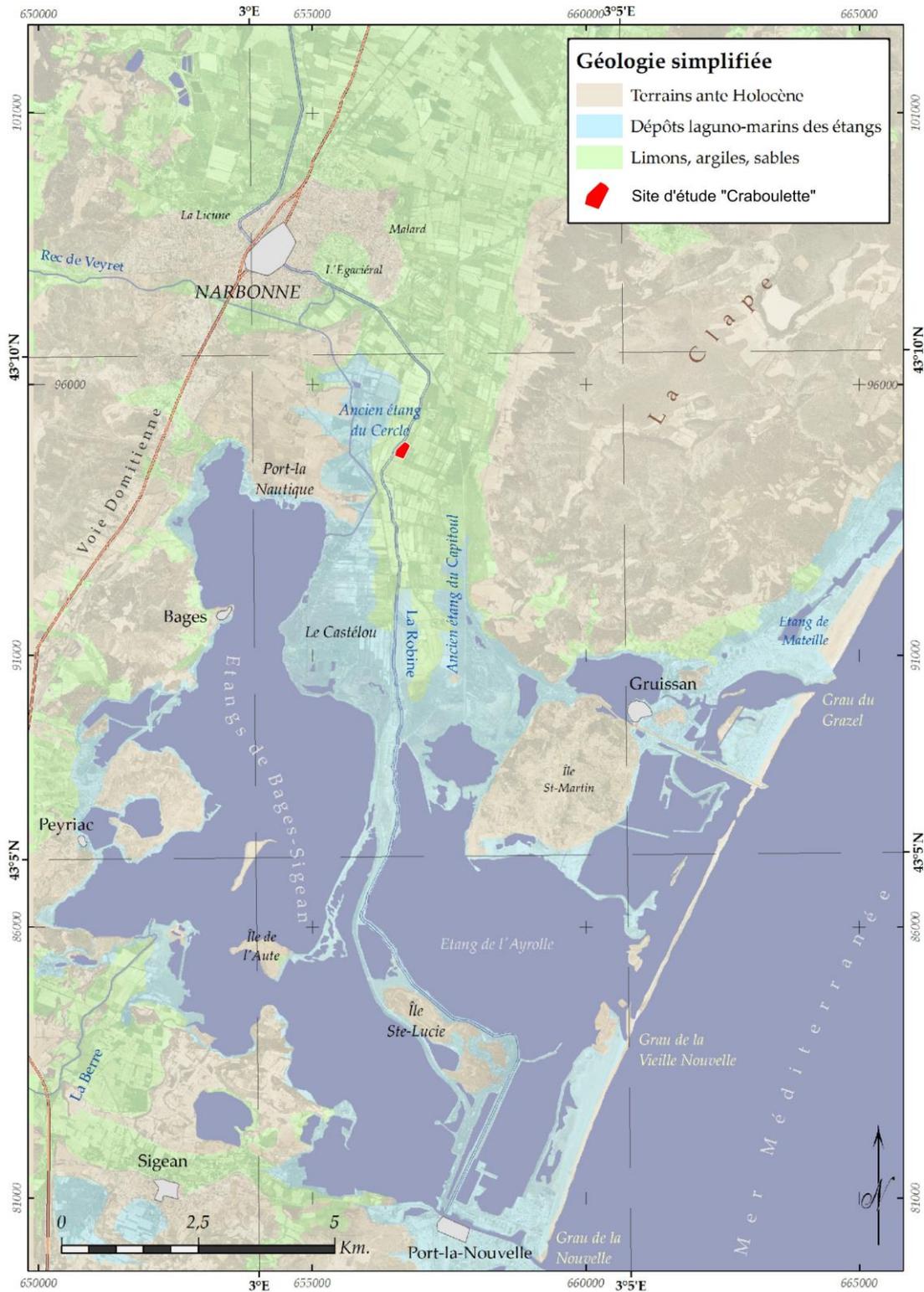
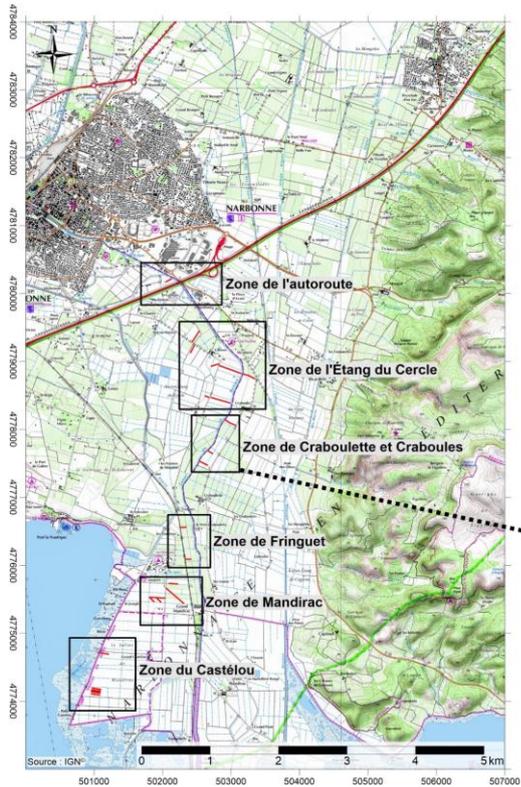
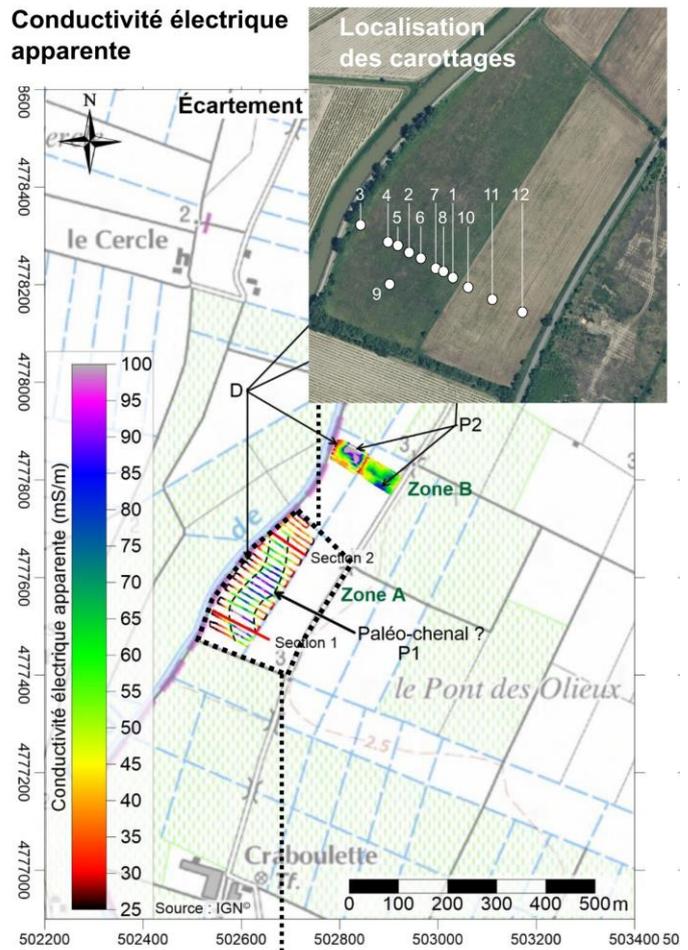


Figure 1 : carte géologique simplifiée superposée sur une image satellite de la région de Narbonne (d'après Julien Caverio) mettant en évidence le bassin des étangs narbonnais holocènes, partiellement déconnectés de la mer Méditerranée par un cordon sableux. Les étangs sont partiellement comblés surtout dans la région nord-est où s'est développé le delta de l'Aude dont la progradation recouvre d'anciens dépôts laguno-marins. À l'aval du delta se forme également des flèches sableuses qui prennent appui sur les îles St Martin, Ste Lucie et de l'Aute, et qui ont compartimenté le bassin lagunaire. Le site de Craboulette se situe au cœur du delta, adjacent à l'actuel tracé du canal de la Robine, héritier de l'ancien cours de l'Aude.



Prospections géophysiques 2015
 BRUNIAUX Guillaume
 MATHE Vivien
 CAMUS Adrien
 FAISSE Camille



Sections de résistivité électrique

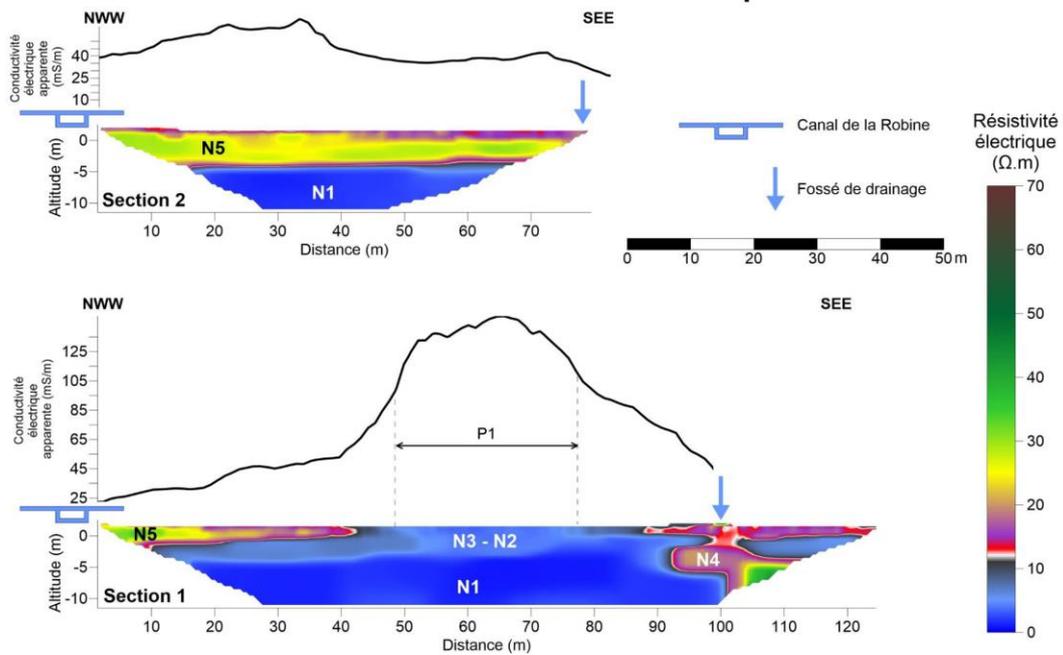


Figure 2 : Prospection géophysique menée en 2015 (Bruniaux et al., 2015), localisation des carottages selon un transect ONO-ESE perpendiculaire à la structure électrique dessinant un tracé sinueux qui suggère la présence d'un paléo-chenal. Le carottage Cra-2, située au coeur de la structure, a été sélectionné pour une analyse sédimentologique détaillée.

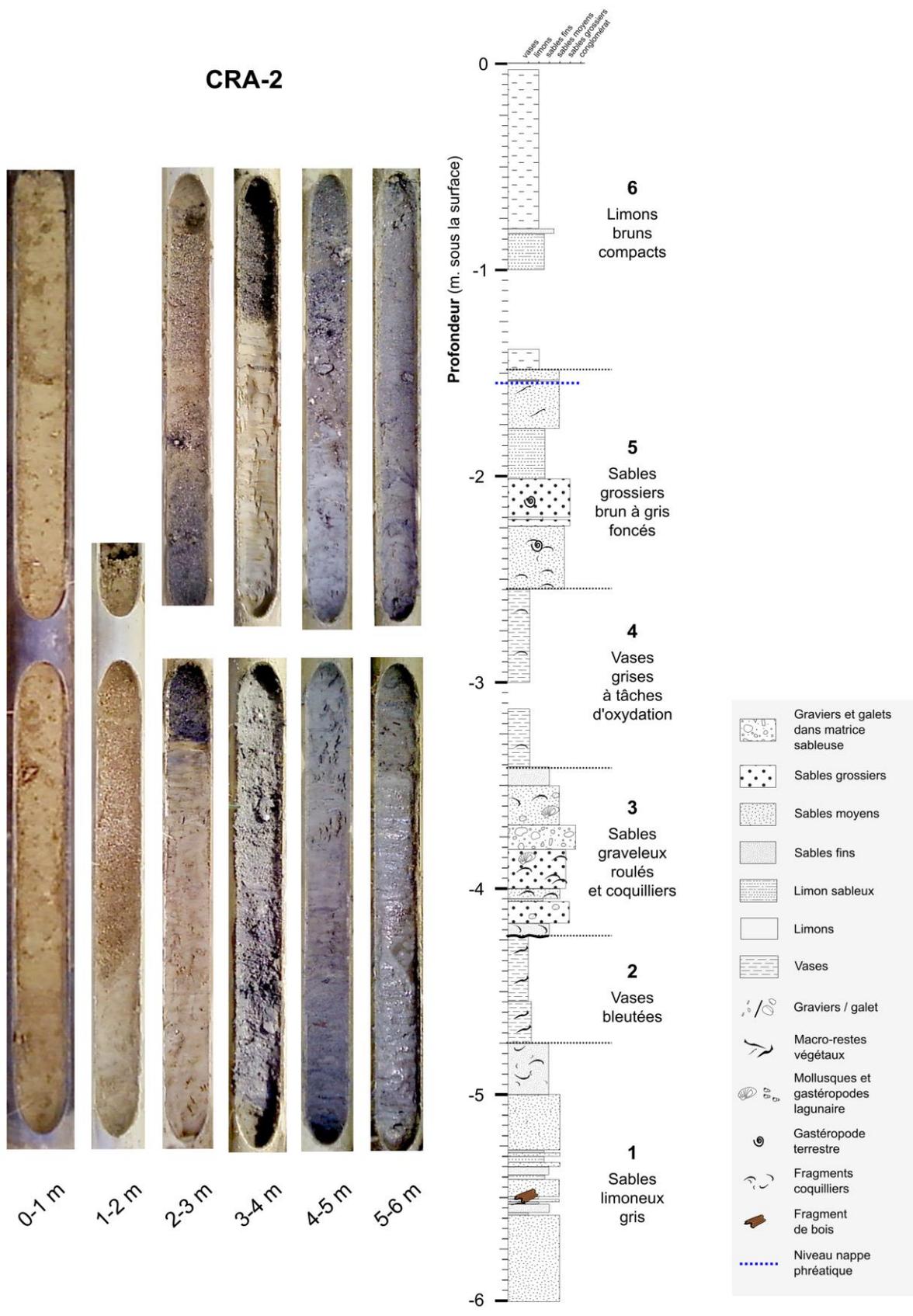


Figure 3 : Colonne sédimentaire du carottage Cra-2.

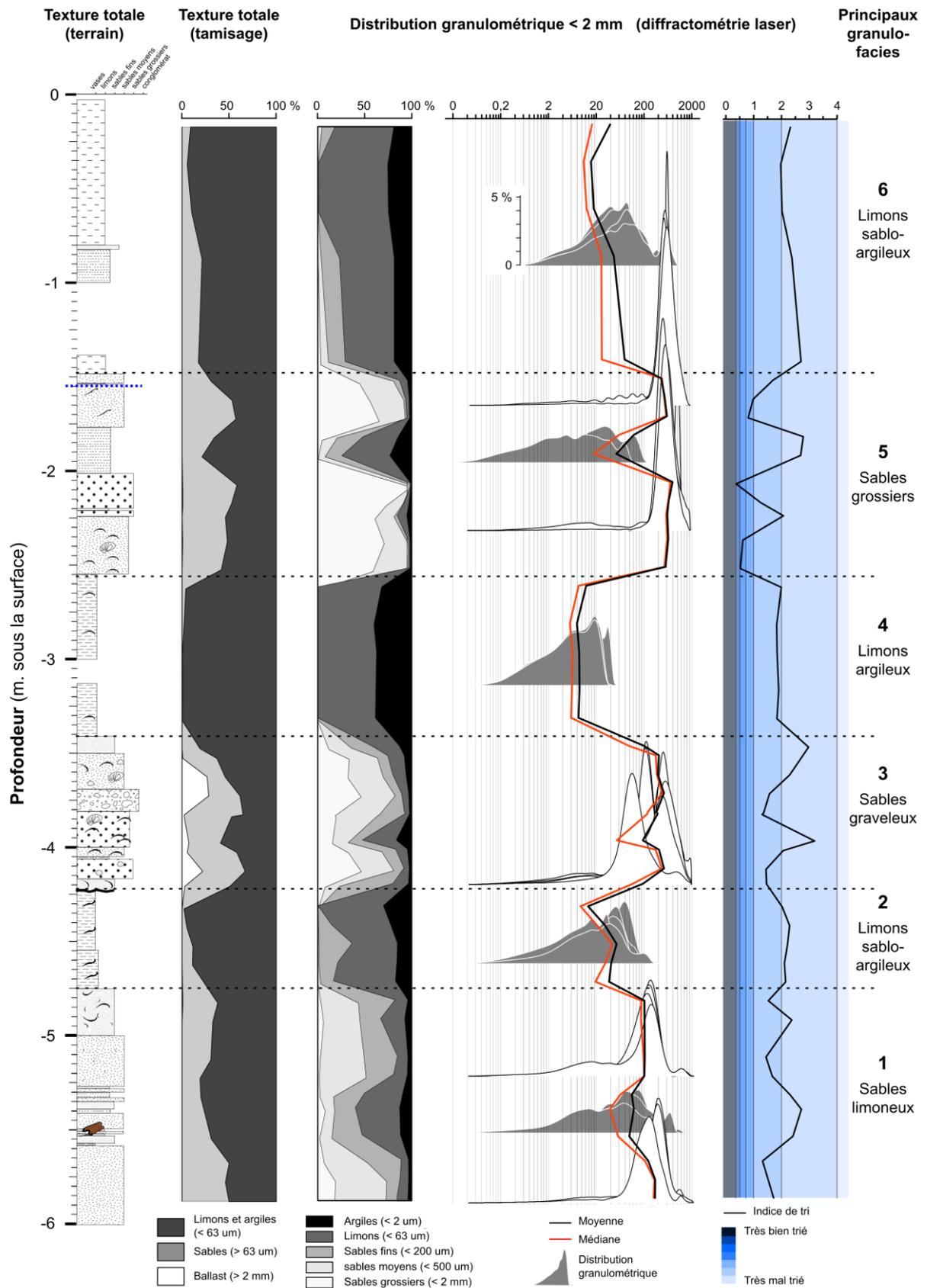


Figure 4 : Colonne sédimentaire Cra-2, granulométrie mécanique par tamisage et granulométrie par diffraction laser (UMR 7730). Indice de tri d'après Folk (1966).

Carottage CRA-2

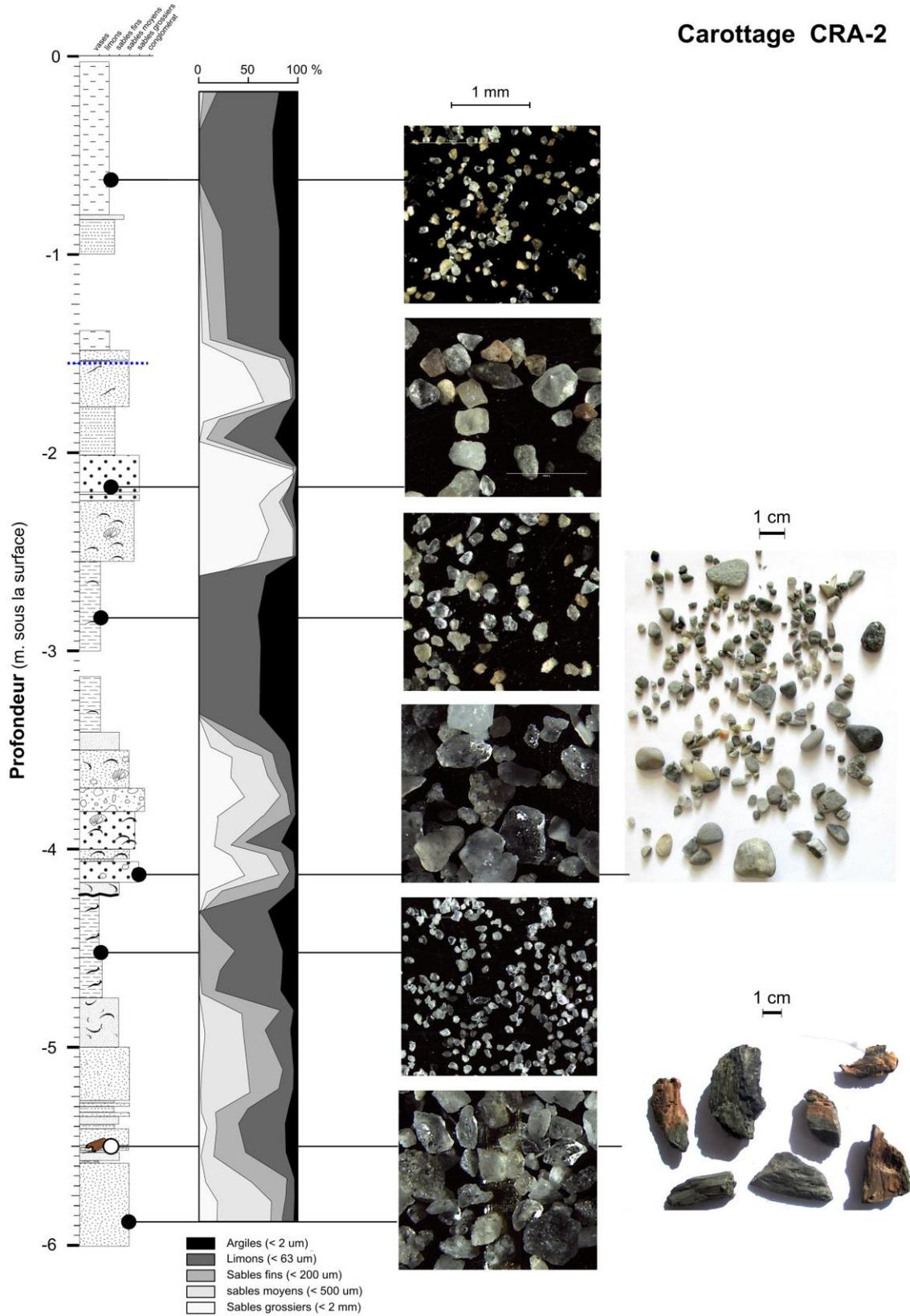


Figure 5 : Colonne sédimentaire Cra-2, texture et photographies des sables, galets et fragments de bois extraits par tamisage.



Figure 6 : Photographies (loupe binoculaire) de l'assemblage d'ostracodes extraits par tamisage de l'échantillon prélevé entre -5,3 et -5,35 m. A/C/D- *Cyprideis torosa* ; B : *Loxoconcha* sp. Détermination réalisée en collaboration avec Tiphaine Salel (Université Montpellier, UMR 5140) et Nick Marriner (CNRS, UMR 6249).



Figure 7 : Photographies de l'assemblage macro-faunistique extrait par tamisage entre -3,8 et -4,2 m (faciès 3). Bivalves : A- *Loripes lacteus* ; B- *Cerastoderma glaucum* ; C- ?? D- *Musculus costulatus* ? E- *Mytilus* sp. ; F- *Macoma tenuis* ; Gastéropodes : G- *Hydrobia* sp. ; H- *Rissoa venusta* ; I- *Bittium* sp. ; J- *Pirenella conica* ; K- *Paludinella sicana* ; L- *Sphincterochila* sp. ? Leur détermination a été réalisée en collaboration avec Nick Marriner (CNRS, UMR 6249).

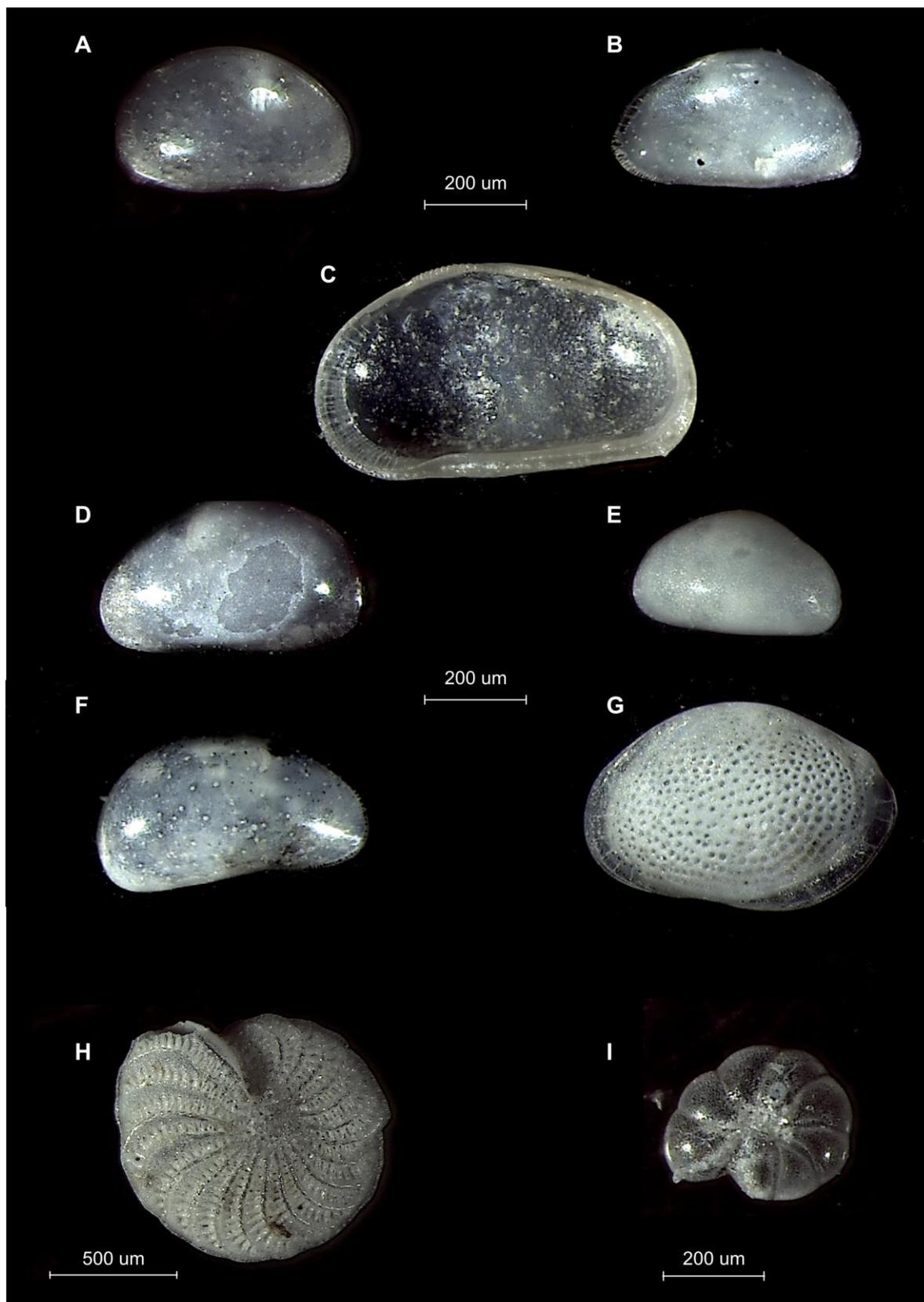


Figure 8 : Photographies (loupe binoculaire) de l'assemblage micro-faunistique extrait par tamisage de l'échantillon prélevé entre -3,81 et -3,86 m. Ostracodes : A/B- *Xestoleberis cf. communis*; C- *Cyprideis torosa* ; D- *Xestoleberis sp.*; E- *Xestoleberis cf. nitida*; F- *Xestoleberis sp.*; G- *Gloxioconcha rhomboidea* ; Foraminifère : H- *Elphidium sp.*; I- *Ammonia beccarii*. Détermination réalisée en collaboration avec Tiphaine Salel (Université Montpellier, UMR 5140) et Nick Marriner (CNRS, UMR 6249).

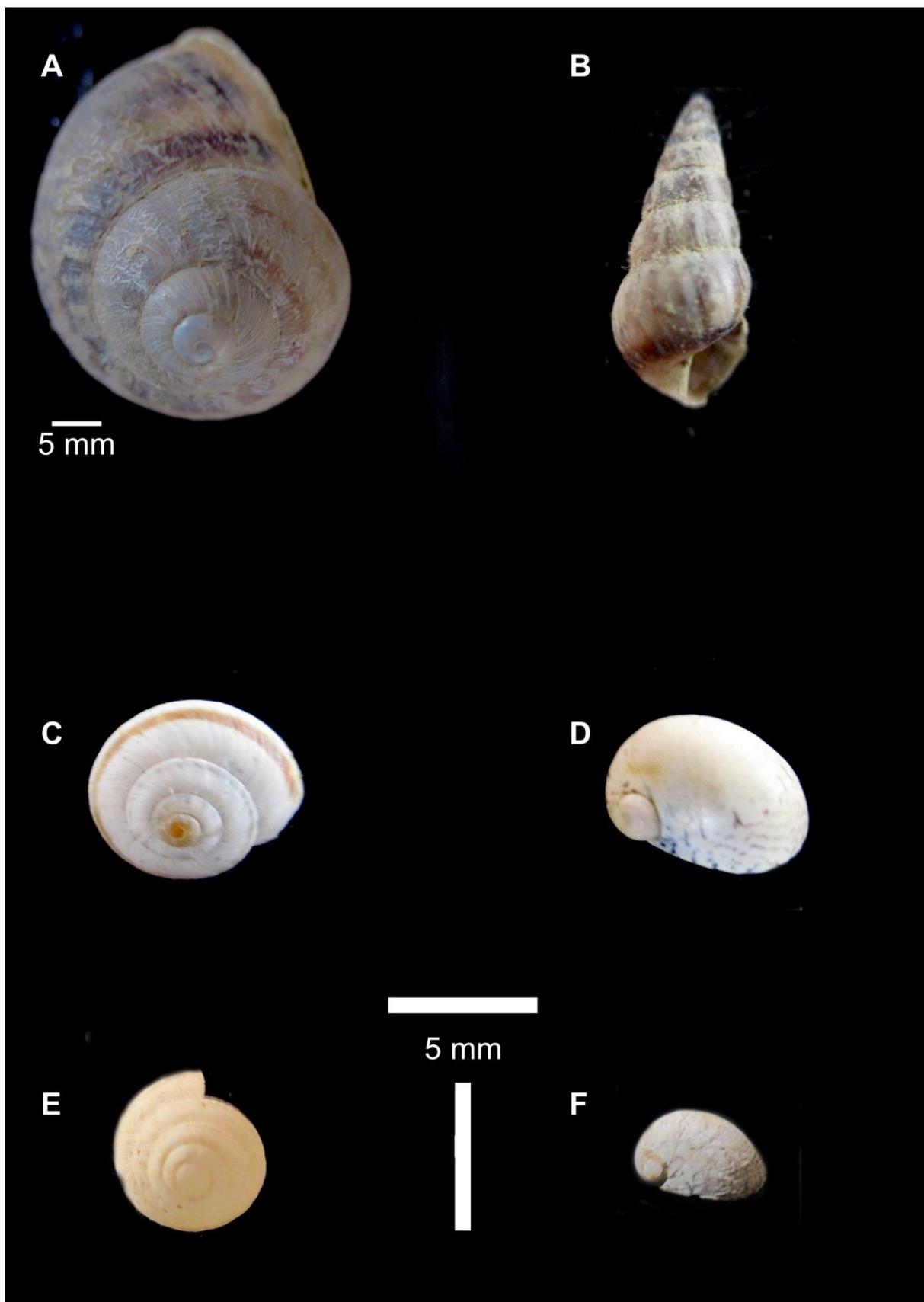


Figure 9 : Photographies de gastéropodes prélevés en surface (A-C), entre -2,35 et -2,4 m (D) et entre -4,8 et -4,85 m (E-F). Non déterminés.

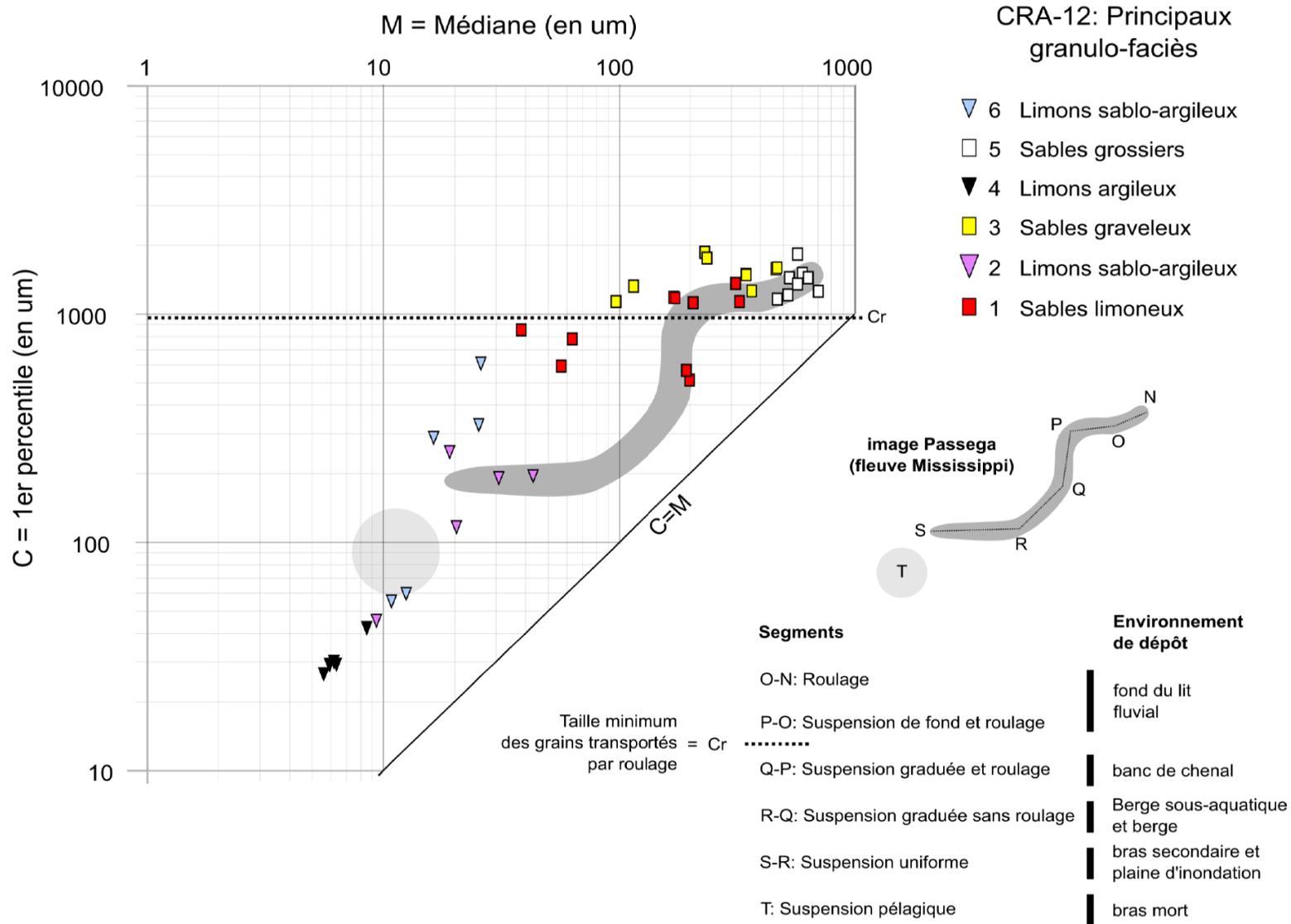


Figure 10 : Diagramme de Passega (C = perrcentile le plus grossier ; M : médiane) de la colonne sédimentaire Cra-2 (46 échantillons).

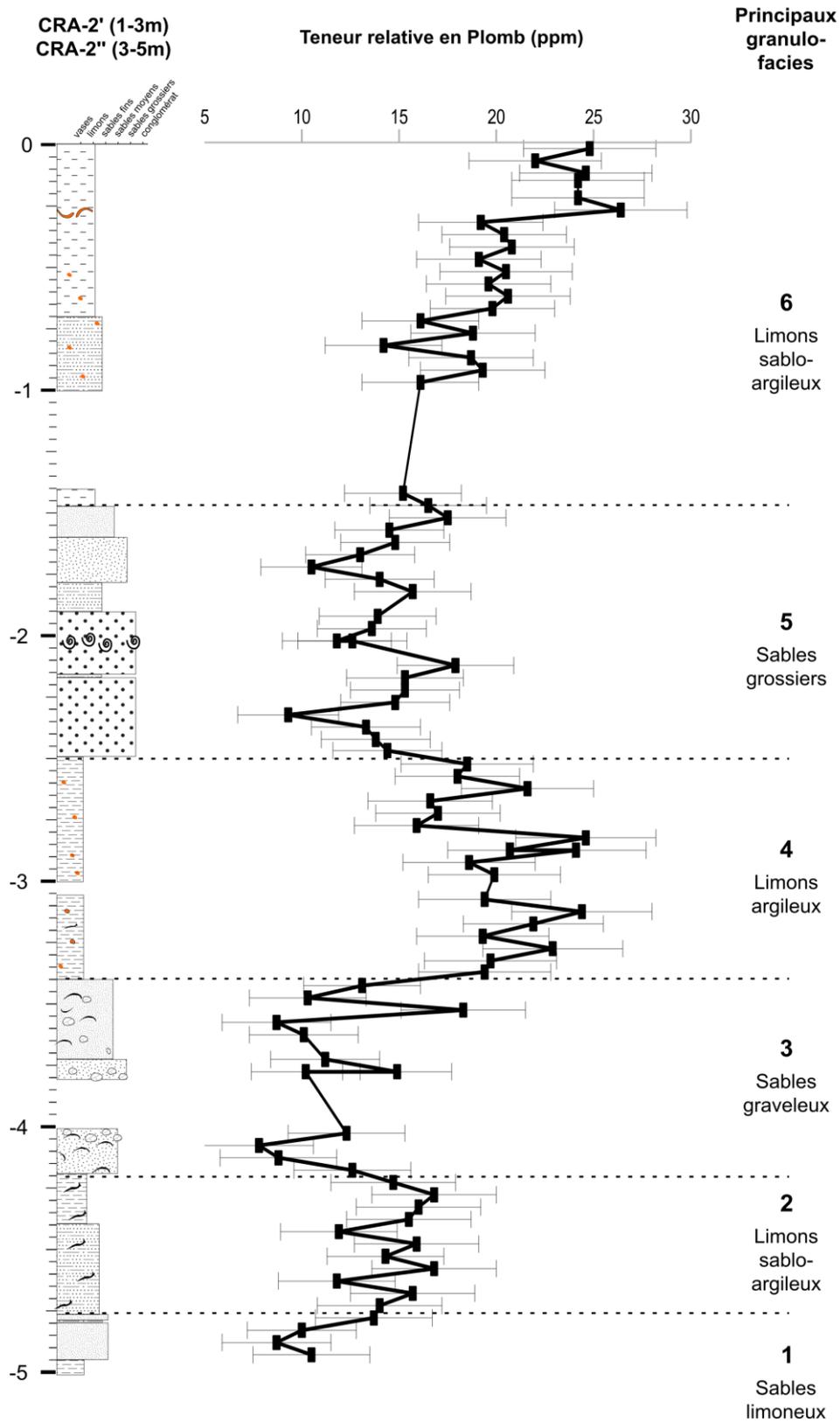


Figure 11 : Colonnes sédimentaires Cra-2' (0-3 m) et Cra-2'' (3-5 m) et variation de la teneur en plomb (ppm) dans le sédiment brut broyé, mesuré par diffractométrie XRF (UMR 5140).

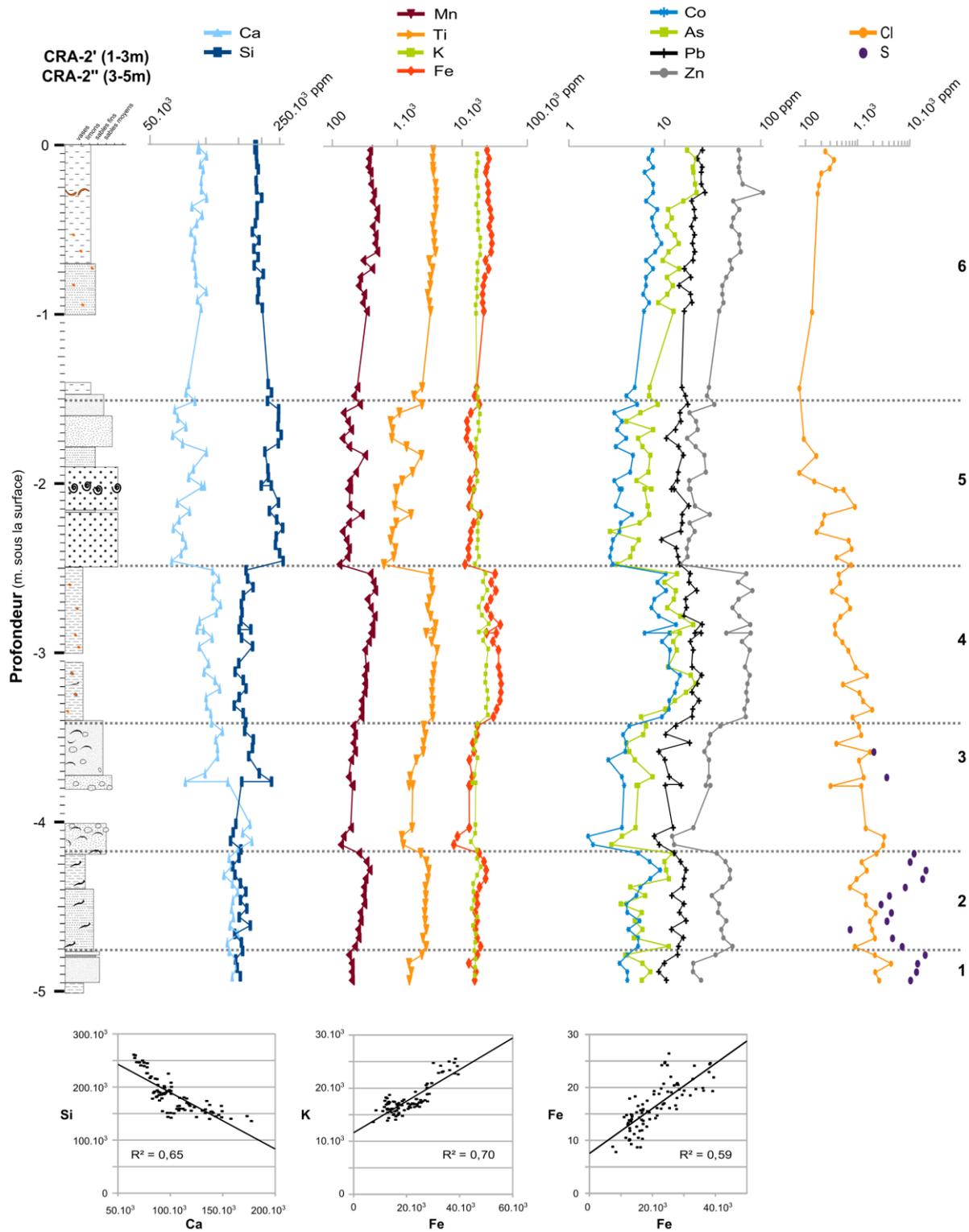


Figure 12 : Colonnes sédimentaires Cra-2' (0 -3 m) et Cra-2'' (3-5 m) et comparaison des teneurs en calcium, silice, manganèse, titane, potassium, fer, cobalt, arsenic, plomb et zinc, mesuré dans le sédiment brut broyé, par diffractométrie XRF (UMR 5140).

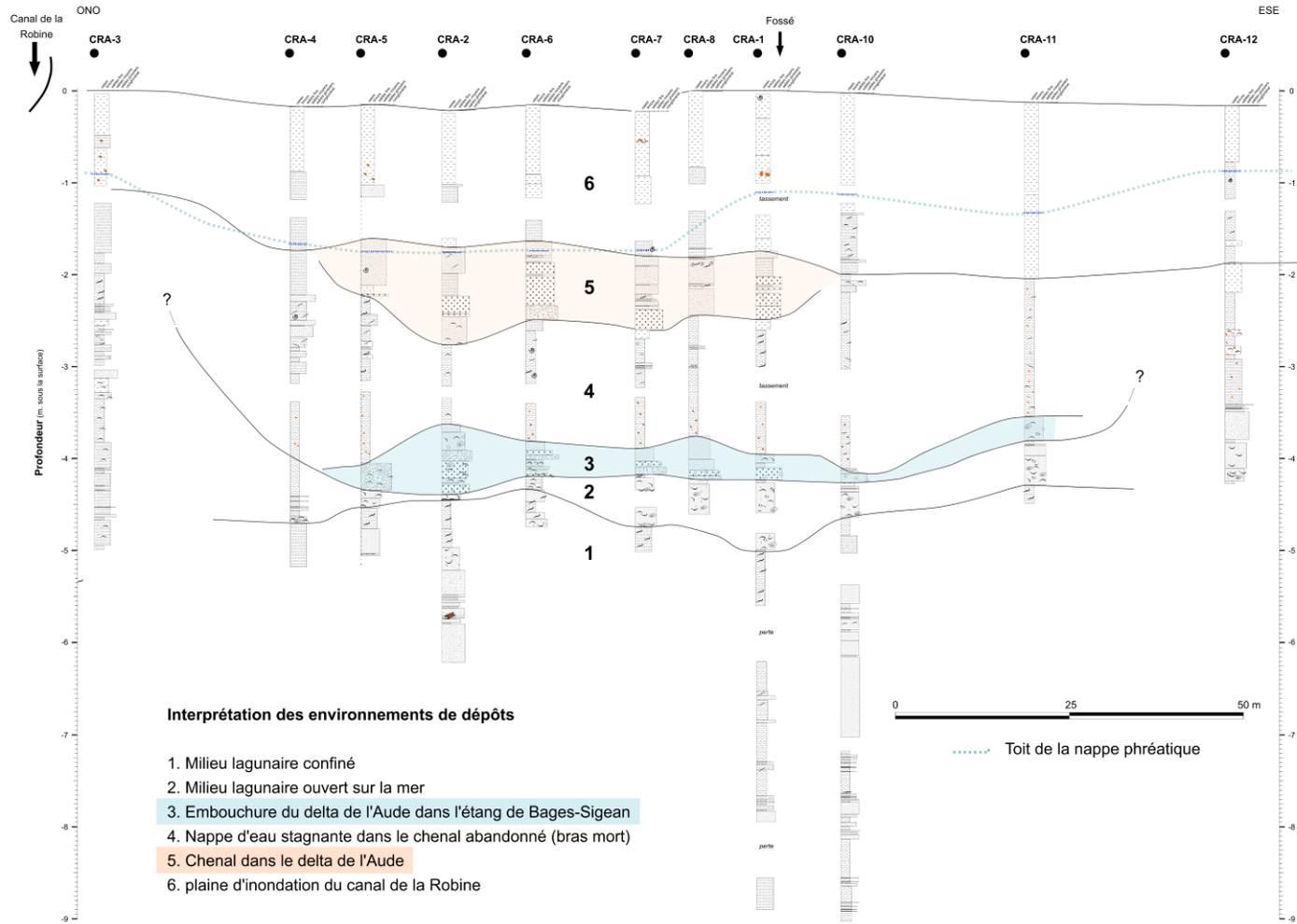


Figure 13 : Transect des carottages Cra-1 à Cra-12 et essai de restitution de la géométrie des principaux corps sédimentaires et leurs environnements de dépôts.

Reconstitution paléogéographique et prospection archéologique en zone littorale par approches géophysiques multi-méthodes et multi-échelles

Résumé :

L'étude archéologique d'un site est réalisée sur la base d'une fouille, qui est une étude précise sur une ouverture restreinte. En amont de cette opération, la prospection géophysique offre la possibilité de localiser une zone susceptible d'apporter des informations majeures par une cartographie détaillée du site. Ces travaux de thèse se focalisent sur un protocole original de prospection magnétique pour détecter des structures pluri-métriques à pluri-décimétriques et une démarche méthodologique pour estimer la conservation d'un niveau d'occupation archéologique. Ces développements ont été réalisés pour apporter un maximum d'information sur l'occupation anthropique et cibler une zone de fouille suivant la problématique archéologique associée au site.

Dans les zones littorales et suivant la période chronologique considérée, l'environnement associé à une occupation était différent. La modification relativement rapide des environnements côtiers résulte de la remontée du niveau marin depuis la fin du dernier maximum glaciaire. Dans le cadre une étude paléoenvironnementale associée à un site, l'objectif de la prospection géophysique est similaire à celle effectuée pour une fouille : localiser une zone d'implantation des carottages paléoenvironnementaux. La démarche méthodologique développée dans ces travaux est basée sur une approche paléogéographique de l'environnement à partir de prospections géophysiques multi-méthodes et multi-échelles. Des prospections électromagnétique (*Slingram*), des sections électriques et des diagraphies électriques (*direct-push*) apportent une représentation cartographique et stratigraphique des contrastes géophysiques de la subsurface. Deux zones d'étude ont été sélectionnées pour tester et mettre en place ces démarches méthodologiques, le site néolithique du Pontet (Charente-Maritime) et les ports antiques de Narbonne. Ces deux sites sont dans des contextes archéologiques, géographiques et géologiques différents.

Mots clés : Prospection géophysique, archéologie, Néolithique, Antiquité, enceinte fossoyée, port antique, zone littorale, paléogéographie, paléoenvironnement.

Paleo-geographical reconstitution and archaeological survey in coastal area by multi-method and multi-scale geophysical approaches

Summary:

Archaeological study of a site is based on an excavation which is a comprehensive study on a restricted gap. Before excavation, geophysical survey supplies the possibility to locate an area likely to provide details by detailed mapping of the site. This PhD work focus on an original magnetic survey protocol to detect pluri-metric and pluri-decimeteric structures and a methodological approach to estimate the conservation of an archaeological level occupation. These developments have provided maximum information on anthropogenic settlement and to target excavation zone according to the archaeological problem of the site.

In coastal zones and according to the considered chronological period, the environment of the settlement was different. The relatively rapid change in coastal environments results from the rise of sea level since the end of the last glacial maximum. As part of a paleoenvironmental study of a site, the objective of geophysical survey is similar to that for excavation: locating an area to paleoenvironmental coring. The methodological approach developed in this work is based on a paleogeographic approach to the site environment using multi-method and multi-scale geophysical surveys. Electromagnetic survey (*Slingram*), electrical tomography and direct-push electrical resistivity logging provide a cartographic and stratigraphic representation of the geophysical contrasts of the subsurface. Two study areas were selected to test and implement these methodological approaches, the Neolithic site of Le Pontet (Charente-Maritime) and the ancient harbours of Narbonne. These two sites are in different archaeological, geographical and geological contexts.

Keywords: Geophysical survey, archaeology, Neolithic, Antiquity, causewayed enclosure, antique harbour, coastal zone, paleo-geography, paleoenvironment



(Littoral, ENvironnement et Sociétés)
2 rue Olympe de Gouges
17000 LA ROCHELLE CEDEX