UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE

ECOLE DOCTORALE « LANGAGE, ESPACE, TEMPS, SOCIETES »

Thèse en vue de l'obtention du grade de docteur en

Archéologie

COMPARAISON DE SIGNAUX (GEOPHYSIQUE, LIDAR) UTILISES DANS L'ETUDE DES DYNAMIQUES ANTHROPIQUES ET NATURELLES

Vol. 1

Présentée et soutenue publiquement par

Clément LAPLAIGE

Le 16 février 2012

Sous la direction de M. le professeur François Favory

Membres du jury :

Philippe Barral : ingénieur de recherche, Université de Franche-Comté

Gérard Chouquer : directeur de recherche, Universités Paris I Panthéon-Sorbonne et Paris X Nanterre

François Favory : professeur, Université de Franche-Comté

Georges-Noël Lambert : chargé de recherche, Université de Franche-Comté

Christophe Petit : professeur, Université Paris I Panthéon-Sorbonne, Rapporteur

Benoit Sittler : Diplom-Geograph, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Alain Tabbagh : professeur, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI , Rapporteur

UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE

ECOLE DOCTORALE « LANGAGE, ESPACE, TEMPS, SOCIETES »

Thèse en vue de l'obtention du grade de docteur en

Archéologie

COMPARAISON DE SIGNAUX (GEOPHYSIQUE, LIDAR) UTILISÉS DANS L'ÉTUDE DES DYNAMIQUES ANTHROPIQUES ET NATURELLES

Vol. 1

Présentée et soutenue publiquement par

Clément LAPLAIGE

Le 16 février 2012

Sous la direction de M. le professeur François Favory

Membres du jury :

Philippe Barral : ingénieur de recherche, Université de Franche-Comté

Gérard Chouquer : directeur de recherche, Universités Paris I Panthéon-Sorbonne et Paris X Nanterre

François Favory : professeur, Université de Franche-Comté

Georges-Noël Lambert : chargé de recherche, Université de Franche-Comté

Christophe Petit : professeur, Université Paris I Panthéon-Sorbonne, Rapporteur

Benoit Sittler : Diplom-Geograph, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Alain Tabbagh : professeur, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI , Rapporteur



« *Dans la fulgurante tourmente qui avait déchainé sur elle la ruine et la mort, la coquille métallique qui enveloppait la planète s'était crevassée et effondrée en une douloureuse caricature de sa propre grandeur.*

Les survivants avaient découpé les plaques de métal et les avaient cédées aux autres planètes en échange de semences et de bétail. Le sol fut, une fois de plus, mis à nu et la planète retourna à ses origines. En ouvrant des territoires de plus en plus étendus à une agriculture primitive, elle oubliait son colossal et complexe passé.

Disons plutôt qu'elle l'aurait oublié sans les puissants tessons qui dressaient leurs ruines massives vers le ciel dans un silence amer et digne. »

Isaac Asimov, Seconde Fondation, 1953

Illustration :

Ch. Nodier, J. Taylor et A. de Cailleux, *Voyages pittoresques et romantiques dans l'ancienne France, Franche-Comté*, Paris, 1825, p. 179 (réimpression en 1977, éd. Lafitte, Marseille)

Remerciements

Ce manuscrit est l'aboutissement de trois années de recherches, période pendant laquelle j'ai pu rencontrer un grand nombre de personnes, scientifiques ou non, que je souhaite vivement remercier.

Je souhaite tout d'abord remercier mes financeurs, à savoir Pays de Montbéliard Agglomération, la région Franche-Comté et le CNRS, sans qui rien n'aurait été possible.

Je tiens sincèrement à remercier les membres du jury : Gérard Chouquer, Philippe Barral, Benoit Sittler, Alain Tabbagh et Christophe Petit pour avoir accepter de rapporter et d'examiner ce manuscrit.

Je tiens à remercier mes deux directeurs de thèses, Georges-Noël Lambert et François Favory, pour le soutien, les corrections et les conseils qu'ils m'ont apportés tout au long de ce travail.

Je ne sais pas si je trouverais les mots justes pour remercier mon encadrant, Gilles Bossuet. Merci de m'avoir accueilli dans ton bureau, merci de m'avoir fait profiter de ta rigueur scientifique et de tes connaissances. Je remercie aussi Carole Bossuet, pour son accueil et sa gentillesse un samedi de fin septembre.

Je remercie très chaleureusement tous les membres du PCR Mandeure, Philippe Barral, Pierre Nouvel, Matthieu Thivet, Jacques Monnier, Cédric Cramatte, Jean-Yves Marc et Séverine Blin, auprès de qui j'ai énormément appris. Je remercie tout particulièrement Pierrot Mougin, qui m'a fait découvrir les charmes de l'arrière pays et de la gastronomie Mandubienne.

Je tiens aussi à remercier Rachel Opitz et Laure Nuninger, membres de l'quipe LIEPPEC, qui m'ont aidé à faire mes premiers pas dans le monde de la microtopographie aéroportée.

Merci aux membres du SRA ainsi qu'à Mr Lassus pour le soutien et les bonnes idées apportées.

Je remercie les membres de l'ARESAC, principalement Hervé Grut et Thérèse Marmier, avec qui je garde un très bon souvenir de la découverte du lingot.

Je remercie également Hervé Richard pour m'avoir accepté au sein du Laboratoire Chrono-environnement en m'offrant les conditions matérielles optimales à la bonne réalisation de cette thèse. J'en profite pour remercier également tous les membres du laboratoire Chrono-environnement pour leur accueil à Besançon

Je remercie aussi la MSHE et tout particulièrement Marion Landré pour le soutien logistique impeccable, rapide, efficace et avec des fonds quasiment illimités.

Je remercie aussi Sylvie Varey et Nathalie Puillet qui, grâce à leurs explications claires, ont réussi à me faire en partie surmonter mon aversion envers les papiers administratifs.

Je remercie les informaticiens du labo, Charles Henri Falconnet et Jean Daniel Tissot qui m'ont toujours aidé quand j'étais, et c'est arrivé au moins à deux reprises, informatiquement dans le besoin.

De plus, je vous remercie pour toutes ces discussions enrichissante (ou moins) le temps des pauses « café/cloppe »

Je souhaite remercier très chaleureusement Catherine Fruchart, pour les promenades en forêt de Chailluz et pour ses conseils et ses corrections. De plus Catherine, sache-le, même si je n'en ai pas toujours l'air, je suis très heureux de te voir à chaque fois que tu décides de passer par la Bouloie.

Je remercie mes jeunes collègues (ou un peu moins) et leur conjointes pour les discussions animées, scientifiques ou non, Que ce soit au labo ou chez les uns ou chez les autres. Grâce à vous, j'ai vraiment passé trois belles années. Merci donc à David, Elise, Damien, Val, Laurent et Alex.

Je remercie également mes amis qui ont eu le courage de venir nous voir jusqu'à Besançon pour passer le week-end (pluvieux). Nous ne nous sommes pas vu souvent, mais ce n'est que partie remise. Merci donc à David et Alex, Camille et Adel, François et Agnès, JP et Alice, Antho et Sophie et enfin Timo.

Je remercie mes parents et mes deux sœurs d'avoir compris mes motivations pour me lancer dans ce travail et pour m'avoir toujours soutenu. J'espère être plus disponible l'année prochaine et m'organiser un peu mieux afin de profiter plus souvent de la douceur du Val de Loire.

Enfin, Maud, tu m'as accompagné pendant quasiment l'intégralité de ces trois ans de thèse, tu as relu intégralement ce manuscrit deux fois, tu as supporté mes sauts d'humeur et mes absences du plan matériel sans broncher. Je ne peux que te remercier et te promet de te rendre la pareille. Ta présence et ton soutien sont inestimables.

Table des matières

Introduction 21

1. Le cadre naturel et anthropique et l'état des connaissances 27

1.1 Caractère de la zone d'étude 27

1.1.1 Contexte géographique et géologique 27

1.1.2 Caractères climatiques et hydrographiques. 28

1.1.3 L'occupation du sol 29

1.1.3.1 Nature de la couverture 29

1.1.3.2 Découpage administratif et statut juridique des terrains 30

1.2 La ville et son territoire : historique des recherches sur le site et son environnement proche du XVIème siècle à nos jours 32

1.2.1 Les recherches jusqu'à la fin du XIXème siècle 32

1.2.2 Les recherches du XXème siècle 34

1.2.3 Le XXIème siècle 34

1.2.3.1 Le PCR Mandeure (Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique : Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs)) 35

1.2.3.2 Le programme LIEPPEC 36

1.3 Dynamique de l'occupation 37

1.3.1 La Préhistoire 37

1.3.2 La Protohistoire 37

1.3.3 L'Antiquité 38

1.3.3.1 L'agglomération d'Epomanduodurum 38

1.3.3.2 L'occupation de l'espace rural 40

1.3.4 Le Moyen Age 41

1.3.5 L'époque Moderne 42

2. Matériel et méthodes utilisés 47

2.1 Les documents cartographiques et les sources manuscrites 47

2.1.1 Les cartes 47

2.1.1.1 Les itinéraires routiers de la fin du XVIIIème siècle 48

2.1.1.2 La carte de Cassini 48

2.1.1.3 Les cartes d'Etat-Major 48

2.1.1.4 Les cartes modernes, le XX^{ème} siècle 49

2.1.2 Les plans et les sources manuscrites 49

2.1.2.2 Les plans de fouilles anciens 51

2.1.2.3 Les plans divers 51

2.2 Les méthodes de détection 52

2.2.1 Les méthodes « internes » 52

2.2.1.1 Les méthodes géophysiques 52

2.2.1.2 Les sondages et les fouilles 63

2.2.2 Les méthodes externes 63

2.2.2.1 Les prospections au sol 64

2.2.2.2 Les prospections aériennes 64

2.2.2.3 La prospection LiDAR aéroportée 67

2.2.3 Conclusions sur les méthodes de détection 81

2.3 Le Système d'information géographique 83

2.3.1 Généralités 83

3. Analyse comparée des signaux en fonction de situations géographiques variées – approche prospective et interprétation archéologique et géoarchéologique des sites 87

3.1 Les recherches sous couvert boisé 89

3.1.1 Etude d'enclos en Forêt de Chailluz (Doubs) 89

3.1.1.1 L'enclos n°1 90

3.1.1.2 L'enclos n°2 91

3.1.1.3 L'enclos n°3 dit du « vieux tilleul » 92

3.1.1.4 Conclusion 93

3.1.2 Etude des mares intra-forestières de Lorraine 93

3.1.2.1 Description de l'objet « mardelle » 93

3.1.2.2 La mardelle de « Belle Forêt » (Bisping, Moselle) 94

3.1.2.3 La mardelle de Dolving (Moselle) (Kohljungswald) 95

3.2 Les recherches sur sol nu 100

3.2.1 Les Bonnots d'Arrues 100

3.2.1.1 L'établissement rural antique des « Bonnots d'Arrues ». 100

3.2.2 Châtillon (Roches-les-Blamont) 103

3.2.2.1 Résultats de la prospection LiDAR 103

3.2.2.2 La prospection magnétique 104

3.2.2.3 Ramassage de surface 106

3.2.2.4 Conclusion 106

3.2.3 Chamabon (Ecurcey) 107

3.2.3.1 La prospection magnétique 107

3.2.3.2 La prospection LiDAR 108

3.2.3.3 Conclusion 108

3.2.4 La plaine alluviale 109

3.2.4.1 Zone d'étude 109

3.2.4.2 Résultats de la prospection électromagnétique 109

3.2.4.3 Résultats de la prospection aérienne 110

3.2.4.4 Résultats de la prospection LiDAR 111

3.2.4.5 Conclusion 111

3.3 Les recherches en milieu urbain ou péri-urbain 112

3.3.1 Le quartier artisanal de « l'Essarté » (Mathay) 112

3.3.1.1 Localisation géographique et historique des recherches 112
3.3.1.2 Les investigations anciennes (1985-1992) 113
3.3.1.4 La prospection pédestre 113
3.3.1.5 La photo-interprétation 114
3.3.1.6 La prospection magnétique et la prospection LiDAR 115
3.3.1.7 Conclusion 117
3.3.2. Faubourg de Pont (Mathay) 118
3.3.2.1 Aperçu de la recherche 118
3.3.2.2 La prospection électrique 119
3.3.2.3 La prospection LiDAR 120
3.3.3 Les « Combolles » (Mathay) 121
3.3.3.1 Aperçu des recherches 121
3.3.3.2 Les prospections aériennes 121
3.3.3.3 La prospection magnétique 121
3.3.3.4 Les prospections électriques et électromagnétiques 122
3.3.3.6 La prospection LiDAR 123
3.3.4 Les « Combottes » (Mandeure) 123
3.3.4.1 Aperçu de la recherche 123
3.3.4.2 La prospection électrique 123
3.3.4.3 La prospection LiDAR 124
3.3.5 Les « Grillottes » (Mandeure) 124
3.3.5.1 La prospection magnétique 125
3.3.5.2 Confrontation avec les autres données 125
3.3.6 Les « Champs Pelletier » (Mandeure) 126
3.3.6.1 Aperçu de la recherche 126
3.3.6.2 La prospection électrique 126

3.3.6.3 La prospection LiDAR 127

3.3.6.4 Conclusion 128

3.3.7 Le complexe monumental cultuel (Mandeure) 128

3.3.7.1 Aperçu de la recherche 128

3.3.7.2 La prospection électrique 128

3.3.7.3 Les prospections magnétique et radar-sol 129

3.3.7.4 La prospection LiDAR 131

3.3.8 Le plateau à l'est du théâtre 131

3.3.8.1 Aperçu des recherches 131

3.3.8.2 La prospection électrique 132

3.3.8.3 La prospection LiDAR 134

3.3.8.4 Confrontation avec le parcellaire napoléonien 135

3.3.8.5 Conclusion 135

3.3.9 Le sanctuaire du Clos du Château 136

3.3.9.1 Aperçu de la recherche 136

3.3.9.2 La prospection électrique 136

3.3.9.3 Nouvelles propositions de restitution du plan du sanctuaire 137

3.3.9.4 Conclusion 141

3.4 Conclusion 143

4. Restitution de dynamiques naturelles et anthropiques – étude de cas 149

4.1 Reconnaissance des formations alluviales quaternaires et des écoulements anciens 150

4.1.1 Cartographie des terrasses alluviales 150

4.1.2 Cartographie des paléochenaux. 151

4.1.2.1 Le modèle numérique de terrain 151

4.1.2.2 La conductivité électrique du sol 152

4.1.3 La relation entre la ville antique et le Doubs 153

4.1.3.1 Dynamique alluviale et anthropique devant le théâtre depuis l'âge du Fer. ... 154

4.1.3.2 Eléments de la dynamique hydrologique holocène 155

4.1.3.3 Les niveaux d'occupation 156

4.1.4 Conclusion 157

4.2 Étude de l'évolution du couvert végétal et l'impact de l'homme sur le milieu durant la période holocène 158

4.2.1 L'occupation du sol au début du XIXème siècle et son évolution à la période contemporaine 159

4.2.2 Analyse du remplissage sédimentaire de la « combe de Warembourg » 160

4.3 Détection et caractérisation microtopographique des sites fortifiés de hauteur et de plaine. La révolution LiDAR ? 161

4.3.1 Répartition des sites fortifiés connus 162

4.3.2 Présentation des sites connus 163

4.3.2.1 Les enceintes de plaines 163

4.3.2.2 Les buttes témoins 164

4.3.2.3 Les enceintes fermées ou rebords de plateau 165

4.3.2.4 Les enceintes quadrangulaires 166

4.3.2.5 Les éperons barrés 168

4.3.2.6 Les escarpements encerclés 168

4.3.3 Présentation des sites inédits détectés grâce à la prospection LiDAR 170

4.3.3.1 Les enceintes de plaines 170

4.3.3.2 Les buttes témoins 170

4.3.3.3 Les escarpements encerclés 171

4.3.4 Conclusion 172

4.4 Restitution de la trame viaire de l'agglomération antique et intégration aux axes de communication de l'est de la Gaule 173

4.4.1 L'agglomération antique et son espace micro-régional 174

4.4.1.1 La zone A, zone périphérique nord-ouest de l'agglomération 174

4.4.1.2 La zone B, zone périphérique sud de l' «Essarté » 177

4.4.1.3 La zone C, zone périphérique est de l'«Essarté» 179

4.4.1.3 La zone D, zone périphérique est de l'agglomération 180

4.4.1.4 Conclusion 182

4.4.2 L'agglomération antique 182

***4.5* Reconnaissance des traces matérielles d'exploitation du milieu forestier : l'exemple des fours à chaux et des places de charbonnier 184**

4.5.1 Caractéristiques morphologiques des anomalies 185

4.5.2 Répartition spatiale des anomalies et relation avec leur environnement 185

4.5.2.1 Répartition des anomalies suivant l'occupation du sol 186

4.5.2.2 Répartition des anomalies suivant la topographie et la géologie 186

4.5.2.3 Relations entre les anomalies de même type 187

4.5.2.4 relations entre charbonnières, fours à chaux et microtoponymes 188

4.5.3 Conclusion 189

4.6 Conclusion 190

Conclusion et perspectives 193

Glossaire 201

Bibliographie 205

Annexe 229

Annexe A: fiche type de prospection 229

Annexe B: rapport de prospection LiDAR de la société Aerodata 237

Annexe C: algorithme utilisé pour classer les points et générer le MNT 283

Annexe D: la découverte du sanctuaire des «Cloux du Château» 287

Annexe E: carte des pentes 291

Introduction

Le paysage est l'un des termes les plus ambigus du vocabulaire usuel et du vocabulaire scientifique. Au sens le plus littéral, le paysage pourrait se définir comme un ensemble de formes dans un espace limité impliquant le point de vue d'un observateur.

Il existe une grande quantité de paysages (CTHS, 2009) : paysages culturels (paysage représentatif d'une région du monde), paysages sonores (état des sons en un lieu et un temps donné), paysages patrimoniaux, paysages audiovisuels (ensemble des programmes proposés par les chaines et les radios d'un pays), etc.

Le paysage joue un rôle essentiel dans notre quotidien. La façon dont il est perçu et géré répond parfois à des intérêts divergents. Ces intérêts évoluent dans le temps et conduisent à un remodelage permanent du paysage où coexistent créations et destructions de certains aménagements (habitat, parcellaire, chemins, routes, etc.) (Chouquer, 2000 ; Daval & Fruchart 2011). Le paysage tel qu'il sera évoqué dans nos propos, est expurgé de toute dimension esthétique et correspond au produit des interactions visibles entre les processus sociaux et la nature (Chouquer, 1996, 2000, 2008 ; Luginbühl, 2007). C'est d'ailleurs cette notion qui est la plus largement partagée.

Afin de caractériser très précisément la réalité matérielle du paysage, il est nécessaire d'une part de reconnaitre avec exactitude le cadre physique et d'autre part de saisir les interrelations entre les hommes et l'environnement, condition indispensable à l'appréciation des origines du modelé du paysage.

La compréhension des paysages passés se fonde sur l'analyse de différentes sources documentaires (archives, plans, photographies aériennes,….) qui permettent ensemble de caractériser bon nombre des évolutions paysagères intervenues notamment depuis l'époque moderne (gestion du territoire agraire, organisation de la propriété foncière, occupation du sol) (Perpillou, 1979 ; Dupouey *et al.*, 2007).

Toutefois, les aménagements plus anciens ne sont ni localisés ni représentés sur des cartes. Leurs traces sont alors décelées dans le paysage actuel de manière efficace grâce notamment à la mise en œuvre conjointe de diverses méthodes de détection : la photographie aérienne, enregistrant des variations topographiques ou colorimétriques à la surface du sol (Chevallier, 1964 ; Chouquer, 1996) et le système LiDAR (Light Detection And Ranging), mesurant les variations microtopographiques à l'aide d'un laser (Sittler, 2004 ; Kooistra & Maas, 2008).

L'étude d'autres paramètres physiques, imperceptibles à nos sens, permet également d'appréhender les traces des paysages passés. Les méthodes géophysiques détectent la présence de vestiges ou de structures enfouies qu'aucun indice ne signale en surface grâce par exemple à la mesure du champ magnétique terrestre ou de la résistivité* du sous-sol (Scollar *et al.*, 1990 ; Hesse, 2005).

Il est largement admis que les méthodes de prospection sont susceptibles de fournir des données archéologiques quant à l'occupation du sol et/ou l'exploitation du territoire (Ferdière, 2006).

A ce titre, elles ont été appliquées depuis plusieurs années sur le site de l'agglomération antique d'*Epomanduodurum* (Mandeure-Mathay, Doubs) dans le nord Franche-Comté. Cette ville est considérée comme la seconde de Séquanie derrière la capitale de cité *Vesontio* (Besançon). Ce site ainsi que son territoire font l'objet depuis plusieurs années de recherches pluridisciplinaires sur les paysages passés et contemporains, principalement dans le cadre d'un projet collectif de recherche (PCR Mandeure), initié depuis 2001 et dont l'un des axes de recherche s'intéresse plus particulièrement à la reconnaissance de l'organisation de l'espace urbain et de ses marges en relation avec les contraintes du milieu naturel (Barral *et al.*, 2001).

Toutefois, alors que les recherches entreprises sur le site depuis une vingtaine d'années avaient bénéficié de données nombreuses et de qualité sur le tissu de l'agglomération antique proprement dite, les connaissances sur l'espace rural environnant étaient restées très lacunaires.

C'est pourquoi un projet LIEPPEC* (LiDAR pour l'Etude des Paysages Passés et Contemporains) a été élaboré en 2008 en réponse à l'appel d'offre de la région Franche-Comté (Nuninger, 2010). Grâce à ce financement, il a été possible d'acquérir une couverture LiDAR* de 240 km², dont les données documentent l'espace géographique de deux fenêtres centrées sur les villes de Besançon (140 km²) et Mandeure (80 km²). Les objectifs de ce projet de recherche sont multiples et concernent plusieurs domaines :

- **la prise en compte du risque archéologique** : à l'aide des reconnaissances opérées dans la plaine du Doubs, comme sur les plateaux et collines environnants, une cartographie des gisements et aménagements humains doit être dressée, à différentes échelles de résolution spatiale. Ces gisements et aménagements humains reposent sur des données de bonne qualité, validées et critiquées, avec des seuils de fiabilité. Ces couches d'information, qui alimenteront à terme le SIG* de PMA* (Pays de Montbéliard Agglomération) et de la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon (CAGB), sont susceptibles de fournir des indications décisives dans le domaine des politiques d'aménagement urbain.

- **la prise en compte de l'aléa naturel** : la reconnaissance du réseau hydrographique ancien de la plaine du Doubs, associé à un enregistrement des processus sédimentaires et à une couverture microtopographique à haute résolution, forment une série de documents de grand intérêt dans l'optique d'améliorer la résolution de la carte de l'aléa fluvial.

- **la qualité des terres agricoles** : les investigations tant géophysiques que géo-archéologiques, complétées par les données LiDAR, ont pour objectifs de restituer et de modéliser informatiquement, sur de vastes surfaces la structuration du proche sous-sol (profondeur des toits des formations grossières, épaisseur des dépôts fluviatiles, représentation cartographique des variations spatiales des la stratigraphie de l'accumulation sédimentaire etc.), données propres à aider à la décision en matière de politique de gestion des terres agricoles (Dabas *et al.*, 1989).

- les implications méthodologiques : la confrontation des méthodes et signaux, concernant les données de natures archéologique ou naturelle, vise à améliorer sensiblement la qualité des cartographies des différentes couches d'informations et leur interprétations.

Le sujet de cette thèse a été élaboré en référence à cette préoccupation. Il vise principalement à comparer les signaux issus de différentes méthodes de prospections dans leur application à la reconnaissance de la ville antique et de son territoire. Ces études se déclinent à partir de différentes problématiques relatives à l'organisation de l'espace urbain, aux formes et aux rythmes de l'occupation rurale, à la dynamique du peuplement et enfin à l'évolution du milieu naturel dans la longue durée.

La volonté d'appréhender à la fois la ville et son territoire nous imposait de travailler à deux échelles spatiales, à savoir le pôle de Mandeure et son contexte microrégional. Il est bien évident que les modalités d'intervention sont en partie communes à ces deux échelles puisqu'il s'agit avant tout de raisonner en termes d'organisation du peuplement dans la longue durée. Toutefois les méthodes d'approche mises en œuvre sont nécessairement adaptées au contexte d'occupation (ville / campagne, plaine agricole / collines boisées) et à l'état de connaissance de ces espaces respectifs (Dabas *et al.*, 2006).

Ce travail de recherche se propose donc de comparer l'apport respectif de différentes méthodes de prospection à la restitution matérielle de paysages passés dans un espace géographique de 80 km², centré sur la ville antique, associant un tronçon de plaine alluviale du Doubs aux plateaux calcaires environnants.

Après une description des caractéristiques géologiques, morphologiques, hydrologiques et administratives de la zone d'étude, un rappel des recherches menées sur le site antique d'*Epomanduodurum* depuis le XVI ème siècle sera réalisé. En effet, le site antique a très tôt suscité l'intérêt des intellectuels et des politiques, il s'est retrouvé à une époque le lieu d'affrontement entre catholiques et partisans de la réforme. Cette première partie se conclura par un aperçu des dynamiques anthropiques dans ce secteur du Doubs du mésolithique à la fin du XIXème siècle et le début de l'urbanisation moderne.

La seconde partie sera consacrée à la description des méthodes de prospections et des outils utilisés pour décrire tout ou partie des paysages. Le volume important de ce chapitre méthodologique s'explique par la nécessité de présenter les outils mais aussi de discuter leurs modes de fonctionnement et leurs limitations.

Dans la troisième partie, ces différentes méthodes de prospection seront appliquées à un échantillon de zones réduites afin de comparer les résultats obtenus en fonction des variations des contraintes environnementales et des types de vestiges à détecter.

Dans la quatrième partie, les études ne seront plus basées sur des comparaisons de signaux *stricto sensu* mais plutôt sur l'analyse, à une plus large échelle, de la contribution de ces méthodes aux diverses problématiques structurant le PCR Mandeure et le programme LIEPPEC.

Première partie

Le cadre naturel et anthropique et l'état des connaissances



Illustration de la couverture de la première partie :

Vue du fond de vallée anthropisé du Doubs avec en arrière plan les plateaux boisés. (C.Laplaige, 2011)

1. Le cadre naturel et anthropique et l'état des connaissances

1.1 Caractère de la zone d'étude

1.1.1 Contexte géographique et géologique

L'espace géographique étudié dans le cadre de ce travail est une zone d'environ 80 km²dans le nord de la Franche-Comté ; centrée sur le site de l'agglomération antique d'*Epomanduodurum,* elle est comprise au Nord entre les plateaux de la Haute-Saône et les collines sous-vosgiennes et le Jura plissé au Sud. Le site antique proprement dit s'étend dans la plaine alluviale du Doubs au débouché de la plaine d'Alsace, dans une zone de passage entre les Vosges et le Jura et sur la « porte de Bourgogne » (fig. 1). Cette zone géographique est un lieu de passage très emprunté depuis plusieurs millénaires : c'est l'endroit où les vallées de la Saône et du Doubs mettent en communication la vallée du Rhône et la vallée du Rhin (Millotte & Lambert 1996).

La délimitation de la zone d'étude s'est effectuée de façon assez simple, puisqu'elle correspond arbitrairement à l'emprise de la prospection LiDAR menée en 2009 autour du site *Epomanduodurum*, soit une fenêtre quadrangulaire de 81 km2 (9 x 9 km) englobant les territoires des deux communes de Mandeure et de Mathay sur lesquels se concentrent principalement les vestiges archéologiques de l'agglomération antique. Les coordonnées « Lambert 2 étendu » de cette zone sont : 931000/2284000 pour le coin nord-ouest et 941000/2275000 pour le coin sud-est.

D'un point de vue géomorphologique elle est constituée de deux plateaux calcaires : le Romont à l'ouest et le Lomont à l'est, séparés selon une direction sud-nord par la vallée du Doubs. La limite méridionale de la zone est constituée par les deux petites vallées de la Roide et de la Ranceuse , affluents du Doubs (fig. 2).

Ces deux plateaux jurassiques tabulaires du Romont et du Lomont sont entaillés par de nombreuses petites vallées dénommées localement « Combes* » et aux écoulements plus ou moins permanents. La karstification très forte de ces terrains explique que l'on observe très peu de circulation en surface. Les deux plateaux sont séparés par le Doubs qui s'est déversé par le fossé d'effondrement de Pont-de-Roide, à l'extrême sud de notre zone d'étude. La plaine alluviale du Doubs est composée d'anciennes surfaces de dépôts dont les plus anciennes (Fx) correspondent aux alluvions siliceuses à éléments d'origine alpine (Aar-Doubs). Elles sont situées à une altitude de 350 à 400 m, soit 20 à 70 m au dessus du fond de vallée actuel. Des éléments d'origine vosgienne peuvent se mêler à ces dépôts. Ils proviennent de l'ancien fleuve alpin, l'Aar-Doubs, qui, depuis Bâle par le Sundgau et la trouée de Belfort, s'écoulait vers la Bresse en empruntant le cours actuel du Doubs.

La terrasse Fy, constitue l'élément morphologique déterminant de la vallée. Composée également d'alluvions calcaires, elle est épaisse de quatre à sept mètres et culmine à une altitude moyenne de 332 à 334 m. Dans le secteur de Pont de Roide, la fouille et l'étude du remplissage de l'abri de Rochedane (Doubs) ont permis de proposer un âge Würmien final à cette basse terrasse du Doubs grâce à l'interstratification de ses niveaux supérieurs avec les niveaux supérieurs archéologiques de

l'abri (Campy et Thevenin, 1978). La reconstitution des différentes phases de genèse du remplissage de l'abri (réalisée à partir des données sédimentologiques et chronologiques) suggère que la fin de l'édification grossière de la basse terrasse précéderait la période de l'Alleröd, au cours de laquelle se serait déposée sa partie limoneuse. A partir de la fin de l'Alleröd, les apports fluviatiles cessent suite à l'enfoncement du cours mineur du Doubs et à la régularisation de son débit.

La terrasse la plus récente Fz (fig. 3) est composée d'alluvions fluviatiles modernes du Doubs et de ses affluents. Ces alluvions sont peu épaisses, 3 à 5 m en moyenne et de composition uniquement calcaire jusqu'à la confluence du Doubs avec l'Allan qui s'opère à hauteur de Voujeaucourt.

Plusieurs horizons calcaires des formations jurassiques (J1a, J1b, J2a, J3, J6, J7a, J8a) ont jadis été exploités comme pierre à bâtir. On peut d'ailleurs observer encore aujourd'hui de très nombreuses carrières abandonnées (BRGM, 1973). Il n'existe à l'heure actuelle aucune exploitation importante, ce qui s'explique par la qualité médiocre des matériaux et la présence importante de diaclases et de fissures. Des exploitations de groise sont signalées au pied des falaises jurassiques, principalement à Pont -de-Roide, au sud de notre zone d'étude.

Quatre formations géologiques renferment du fer propre à leur exploitation. On peut en mentionner tout d'abord des niveaux à oolithes ferrugineuses datés de l'Aalénien (IJ), situés juste au sud-ouest de notre zone d'étude. Des oolithes ferrugineuses du Callovien moyen-supérieur (J3) qui étaient exploitées à l'ouest du coté de Glainans. Des oolithes et des calcaires ferrugineux dans les couches Argoviennes (J5), exploitées au sud de l'anticlinal du Lomont. Enfin on note la présence de granules pisolithiques dans des argiles sidérolithiques extraites durant le XIXème siècle pour le compte de forges d'Audincourt et qui se situaient au nord de Montbéliard.

Sur les plateaux, les sols se développent directement à partir des calcaires en place, dont ils demeurent fortement dépendants. Ces sols présentent une dominante brune et sont très peu épais (de 10 à 30 cm). Leur substrat est tantôt une dalle en place, tantôt un banc diaclasé débité en pavés et cailloux supra-décimétriques. Dans les deux cas, le contact entre la terre fine et la roche se fait par une couche très mince de calcaire. On peut aussi trouver des sols humo-calciques, qui ne sont pas différenciés en couches et qui ne comportent qu'un seul horizon. Enfin, on rencontre également des sols dits « sols des lapiez », situés au niveau de roches massives et pures, démantelées en laizines par de la fracturation grossière. Ces sols ne sont quasiment pas transformés et l'on parle plutôt d'humus fibreux et rougeâtre.

Dans le fond de vallée, les sols se sont formés sur les formations quaternaires des terrasses alluviales décrites précédemment. Ils sont plutôt basiques, au sens chimique du terme, avec une forte influence des battements de la nappe alluviale. Ils demeurent à la fois bien drainés et bien alimentés en eau durant l'été.

1.1.2 Caractères climatiques et hydrographiques.

Cette région du Nord Franche-Comté est soumise à un climat océanique dégradé, c'est-à-dire qu'elle subit aussi des influences continentales. Il y pleut un peu moins de 1000 mm par an, avec des pluies

continues tout au long de l'année (fig. 4). Les températures sont proches de 0°c l'hiver pour atteindre la vingtaine de degrés en juillet et août.

Un vecteur fluviatile, le Doubs et ses dépôts alluvionnaires (cf. supra) occupent la partie médiane de la zone d'étude. Le Doubs, d'une longueur de 453 km, prend sa source à Mouthe (25), près de la frontière suisse, à 937 m d'altitude. Il s'écoule vers le nord-est en traversant le lac de Saint-Point (520 ha) puis le lac de Chaillexon (80 ha), marquant dès ce moment la frontière entre la France et la Suisse qu'il va indiquer durant quelques dizaines de kilomètres avant d'effectuer une boucle de 10 km en Suisse (le Clos du Doubs) qui lui fait prendre une direction plein ouest jusqu'à Saint-Hippolyte. Son cours s'infléchit alors en direction du nord durant une quinzaine de kilomètres, traversant ainsi notre zone d'étude, avant de s'orienter vers le sud-ouest, orientation qu'il conserve ensuite en suivant le faisceau de pli de Besançon puis en s'écoulant dans la plaine de la Saône jusqu'à Verdun-sur-le-Doubs où il se jette dans la Saône.

En aval de Pont-de-Roide, la vallée du Doubs s'élargit fortement, en passant de 1 à 2 km de large sur ce tronçon de la rivière. Le cours d'eau qui a déjà parcouru près de 200 km, coule en direction du nord pendant huit km puis effectue un virage vers l'est, formant la « boucle de Mandeure», en rencontrant des terrains plus résistants, des calcaires du Kimmeridgien inférieur (J7). Après 3 km parcourus dans cette direction, la rivière se dirige à nouveau vers le nord (fig. 2) en empruntant la vallée creusée par l'Aar-Doubs.

A Mathay, au centre de notre fenêtre, le débit médian de la rivière est de 53 m^3/s pour un maximum enregistré de 723 m^3/s en février 1990 (données hydro station n°U2222010). Le bassin versant a une superficie de 1943 km^2. Le régime hydrique est pluvio-nival, avec les débits maximum mesurés entre novembre et mars, conséquence des précipitations et de la fonte du manteau neigeux du Jura. Le débit d'étiage est d'environ $8m^3/s$.

1.1.3 L'occupation du sol

1.1.3.1 Nature de la couverture

L'occupation du sol a été restituée à partir des données issues de la base *Corine Land Cover 2006,* base de données européenne d'occupation biophysique des sols pilotée par l'agence européenne de l'environnement (EEA). Les données sont produites par photo-interprétation des images satellites, avec une précision de l'ordre de 20 à 25 m (European Environment Agency, 2007). La nomenclature utilisée pour la représentation cartographique privilégie l'occupation biophysique du sol à son utilisation en classant la nature des objets (cultures, forêts, surfaces en eau,...) plutôt que leur fonction socio-économique.

Selon cette nomenclature, la superficie de la zone (81 km^2) est occupée à 49% par des forêts et des milieux semi-naturels qui correspondent respectivement aux forêts de feuillus, aux forêts de conifères et aux forêts mélangées ainsi qu'aux pelouses et aux pâturages naturels.

La zone est composée également à 34 % par des territoires agricoles, regroupant les terres arables hors périmètre d'irrigation, les vergers, les systèmes culturaux et parcellaires complexes et les surfaces essentiellement agricoles.

Les territoires artificialisés représentent 17% de la surface étudiée avec les tissus urbains continus et discontinus, les zones industrielles et commerciales, le réseau routier, les mines, les chantiers et les équipements sportifs (fig. 5).

L'examen de la représentation de l'occupation actuelle du sol sur l'ensemble de la zone montre qu'il existe une différence très contrastée entre la couverture des plateaux et celle des fonds de vallées. Le fond de la vallée du Doubs est largement urbanisé et artificialisé (61%) avec quelques espaces agricoles (31 %) et très peu d'espaces forestiers et/ou semi naturels (8%) (fig. 6). Le plateau est majoritairement recouvert de forêts (57%) et de quelques zones agricoles (35 %). On y observe très peu de zones artificialisées (8%) : la pénétration de l'habitat est difficile dans les zones de plateau, alors que le fond de vallée se prête mieux à l'extension urbaine. Nous sommes ici dans la grande banlieue de Montbéliard, et cette différence d'occupation du sol entre les plateaux et la vallée peut s'expliquer, au moins pour partie, par le fait que les temps de trajets depuis le fond de vallée pour rejoindre le pôle urbain actuel sont bien plus courts que depuis les plateaux. L'évolution observée dans l'occupation du sol s'explique également par la médiocre qualité des sols des plateaux, où des pratiques agricoles limitées ont laissé une large place aux pâturages et aux espaces boisés.

Cette différence entre la nature de la couverture des plateaux et celle du fond de vallée a eu une incidence directe sur la mise en œuvre des différentes méthodes de prospection et l'exploitation de leurs résultats. Ces effets induits sont détaillés dans la partie suivante, consacrée aux matériels et méthodes.

1.1.3.2 Découpage administratif et statut juridique des terrains

La zone d'étude englobe tout ou partie du territoire de 18 communes du Nord Franche-Comté (Audincourt, Autechaux-Roide, Berche, Blamont, Bondeval, Dampierre-sur-le-Doubs, Ecot, Ecurcey, Etouvans, Mandeure, Mathay, Neuchâtel-Urtière, Pont-de-Roide, Roche-lès-Blamont, Seloncourt, Thulay, Valentigney, Voujeaucourt) (fig. 7).

Du point de vue administratif, une partie seulement (Audincourt, Mandeure, Mathay, Seloncourt, Valentigney et Voujeaucourt) des 18 communes concernées appartient à la Communauté d'Agglomération du Pays de Montbéliard (CAPM) créée en 1999, et devenue depuis 2011 Pays de Montbéliard Agglomération (PMA). Grâce à une convention passée avec cette collectivité, nombre de données informatisées intéressant notre zone d'étude (plans, orthophographies,…) ont pu être intégrées à notre Système d'Information Géographique.

Au plan juridique, ces différents territoires sont constitués dans des proportions très variables de terrains communaux et de terrains privés. Après avoir effectué le recensement des terrains communaux auprès de chacune des mairies, la représentation de leur distribution spatiale montre que les parcelles

communales sont principalement recouvertes de forêts et situées sur le sommet et les versants des plateaux (fig.7).

Ces parcelles communales sont des espaces beaucoup plus accessibles aux prospections au sol (pédestres ou géophysiques) que les parcelles privées car nous disposions en effet pour les prospecter tout au long de l'année d'une autorisation globale délivrée par chacune des mairies. La plupart de ces parcelles communales se situent en forêt et sur les hauteurs des deux plateaux. Sur ces terrains, le couvert végétal plus ou moins dense et inextricable limite les prospections en rendant quasi inopérantes les photographies aériennes et beaucoup plus compliquées et difficiles les reconnaissances au sol (reconnaissance à vue et reconnaissance géophysique). Les effets induits par les différents types de couverture du sol sur l'application des méthodes de prospection seront détaillés dans la partie consacrée aux aspects méthodologiques.

1.2 La ville et son territoire : historique des recherches sur le site et son environnement proche du XVIème siècle à nos jours

1.2.1 Les recherches jusqu'à la fin du XIXème siècle

L'intérêt intellectuel pour le site antique de Mandeure commence durant la deuxième partie du XVIème siècle. La première découverte archéologique connue à Mandeure, un trésor monétaire, remonte à 1548. En 1581, le Comte Frédéric de Wurtemberg-Montbéliard (1557-1608) ordonne les premières fouilles. Il charge officiellement Jean Bauhin de rassembler à Montbéliard le mobilier découvert sur le site en 1594. L'identification de Mandeure à l'*Epomanduodurum* de l'itinéraire d'Antonin est due à Heinrich Schickhardt (1558-1635) qui, dans une brève notice en allemand, mentionne l'intérêt du site et les découvertes archéologiques en 1602.

Dès la fin du XVIème siècle, le clivage entre le catholicisme et la réforme entraine une concurrence constante entre Besançon et Montbéliard. Les équipes montbéliardaises se concentrent principalement sur les thermes de « Muraillebourg » (fig. 8) et les équipes bisontines au lieu-dit « les Montoilles », à la sortie ouest du village de Mandeure. Cette concurrence est restée très vive jusqu'à la fin du XIXème siècle, les musées de Besançon et de Montbéliard tentant chacun de récupérer les collections de mobilier avant leur concurrent.

Quelques objets sont découverts durant le XVIIème siècle, comme par exemple un cachet d'oculiste en 1606 ou des mosaïques en 1615. Ils intègrent la collection de Louis-Frédéric de Montbéliard (1586-1631), en partie dispersée entre 1699 et 1723. Toutes ces découvertes, ainsi que leur localisation, restent très mal renseignées. Les recherches de l'époque ne s'intéressant principalement qu'à la découverte de beaux objets plutôt qu'à une reconnaissance de l'organisation globale des vestiges.

En 1780, le conseiller Léonard Parrot (1755-1836) se prend de passion pour le site antique de Mandeure et entreprend des fouilles de 1781 à 1785 tout d'abord sur le temple du « Clos du Château » puis sur les thermes de « Muraillebourg ». Il présente quelques belles trouvailles et fait le point sur ses fouilles dans une note manuscrite datée du 23 mars 1785. Les objets recueillis sont venus enrichir la collection des princes de Montbéliard et les jardins du château d'Etupes. Léonard Parrot ne publia jamais ses découvertes et c'est le Montbéliardais Charles Duvernoy (1774-1850) qui recueillit et exploitat ses notes (Parrot, 1835).

L'activité archéologique prend un nouvel essor au début du XIXème siècle, comme un peu partout en France. Des essais de synthèses seront entrepris, principalement par Charles Duvernoy et par l'Abbé Bouchey, et de véritables recherches archéologiques de terrain sont menées par l'architecte Frédéric Morel-Macler et le professeur Clément Duvernoy.

Charles Duvernoy, conservateur de la bibliothèque de Montbéliard, prit des notes dans les archives anciennes, mais surtout exploita les notes de Parrot sans jamais le citer. Il fournit des éléments à Golbery pour la notice « Epomanduodurum (Mandeure) » insérée en 1828 dans le tome 3 des Antiquités d'Alsace et fournit de nombreuses notices dans les annuaires du Doubs.

En 1862, Eugène Bouchey (1828-1887) publie une compilation de notes ainsi qu'une illustration du plan des ruines empruntée à Morel-Macler dans ses « Recherches historiques sur Mandeure » (fig. 9) dont la moitié du premier volume est consacré à la ville antique (Bouchey, 1862).

Au début des années 1820, François Morel-Macler (1787-1884) fouille le théâtre, il laisse un fonds de mobilier et surtout une importante série de planches. Mais en dépit de l'engagement de Prosper Mérimée en 1836, Morel-Macler ne réussit jamais à poursuivre ses fouilles sur le reste de la ville Antique. Au cours de cette période, il releva très précisément sous la forme d'un plan l'ensemble des élévations de terrain (murgers) correspondant aux traces laissées par la ville antique dans les champs aux alentours du village de Mandeure (fig. 9) (Morel-Macler, 1822, 1847, 1860, 1881).

Clément Duvernoy (1818-1909), professeur au collège de Montbéliard est, en 1852, l'un des fondateurs de la société d'émulation de Montbéliard (SEM). Il organise plusieurs fouilles, aux lieux-dits « Muraillebourg », « Aux Boutiques » (Duvernoy, 1880), « Au clos du Château (Duvernoy, 1882) mais aussi à l'extrémité occidentale de l'agglomération, en rive gauche du Doubs, sur la commune de Mathay.

Clément Duvernoy ne fouille pas uniquement la ville antique, il étend aussi ses recherches à toute la région environnante. C'est à lui que l'on doit principalement la réalisation d'un premier inventaire archéologique diachronique compilant toutes les traces d'occupations reconnues en Franche-Comté et bien au delà du périmètre de la ville antique. On peut citer par exemple les fouilles du camp néolithique sur le mont Bart (au nord de notre zone d'étude) (Duvernoy, 1875) ou les études menées sur le site protohistorique de Chatillon à Roches-les-Blamont (fig. 8).

Les fouilles sur le site de Mandeure se déroulent jusqu'en 1885 ; à partir de ce moment, la SEM s'attache à contrôler les fouilles anarchiques des particuliers et à recueillir le matériel découvert. Parmi toutes les trouvailles, il faut souligner la découverte en 1886 au sanctuaire du « Clos du Château » d'un trésor de plus de 900 kg de lingots d'argent. Cette découverte encourage évidemment les habitants à mener leurs propres recherches afin de remonter du mobilier susceptible d'être revendu (Jeannin, 1986).

La SEM réalise en 1895 un plan des vestiges replacé sur le cadastre napoléonien. Ce plan indique, outre les vestiges fouillés, la position des nombreux tas d'épierrement ou murgers qui matérialisent à la surface du sol la présence des vestiges enfouis (fig. 10).

Les activités de recherches s'arrêtent alors sur Mandeure malgré les tentatives du pasteur Blaise Mériot et du docteur Marcel Duvernoy pour maintenir un intérêt archéologique pour la ville antique d'*Epomanduodurum* ; il va falloir attendre les années 1950 pour que la communauté scientifique s'y intéresse à nouveau. Les zones explorées avaient d'ailleurs été en grande partie remblayées durant ces cinquante années sans campagne de fouille.

1.2.2 Les recherches du XXème siècle

Les recherches ne reprirent qu'après la seconde guerre mondiale grâce, entre autre, à l'intervention du docteur Robert Cuisenier qui dégage la façade du théâtre en 1952. Il encadre ces travaux avec Marcel Duvernoy, tous deux membres de la SEM. L'ensemble de la *cavea*, les premières rangées de gradins, l'*orchestra* ainsi que la façade ouest ont été dégagées au cours de ces fouilles qui ont permis l'exhumation de nombreux blocs architecturaux et la reconnaissance de la longueur totale de la façade (142 m).

Dans les années 60, Yves Jeannin, conservateur au musée de Montbéliard puis à la Direction Régionale des Antiquités Historiques de Franche-Comté prend en charge la restauration du théâtre mais il réalise surtout de nombreuses fouilles (sondage rue des Anglots en 1956, l'Essarté, quartier artisanal antique, en 1960) (fig. 8). Ses travaux ainsi que ceux publiés postérieurement par Edmond Frezouls (Frézouls, 1988) ont contribué à mettre en évidence la place de ce site parmi les grandes agglomérations de l'Est de la Gaule.

A partir des années 80, des projets de recherches intégrant les fouilles mais aussi des méthodes de détection comme la photographie aérienne se mettent en place. L'accent est mis principalement sur deux quartiers, « l'Essarté » et le « Faubourg de Pont » à Mathay. Ces travaux se concentraient principalement sur les quartiers artisanaux dévolus à la production céramique ou métallurgique (Mangin *et al.*, 1986).

La création en 1988 d'un poste d'archéologue au sein du Syndicat Intercommunal à Vocation Archéologique de Mandeure-Mathay, occupé depuis par Pierre Mougin, a contribué également à la surveillance archéologique de l'ensemble des travaux réalisés sur les territoires de ces deux communes. Un des congrès de la société Française pour l'Etude de la Céramique Antique en Gaule (SFECAG) a été organisé à Mandeure en 1990 (Rivet, 1990). Le site est depuis considéré comme l'une des principales agglomérations de Gaule Belgique et de Germanie (Petit & Mangin, 1994).

De nouvelles données, comme la découverte de nécropoles* gauloises, ont permis d'apporter des éléments sur l'émergence et les origines de la ville antique (Barral, 1996). De nouvelles investigations réalisées sur des édifices fouillés antérieurement, ont par ailleurs mis en exergue des informations complémentaires, à l'image des fouilles conduites par Pierre Mougin et David Watts en 1996 sur les thermes de Courcelles-les-Mandeure (Mougin & Watts, 1996).

1.2.3 Le XXIème siècle

Depuis dix ans maintenant, les connaissances sur le site et son environnement proche sont alimentées par les nombreuses découvertes effectuées lors d'interventions ponctuelles ou programmées conduites dans différents cadres de recherche : fouilles préventives de l'INRAP (Institut National de Recherche et d'Archéologie Préventive) ou de sociétés privées, surveillances et observations faites par le SIVAMM, mais surtout actions programmées de fouilles et de prospections spécialisées du PCR Mandeure (Programme Collectif de Recherche), piloté par Philippe Barral (IR, Université de

Franche-Comté, UMR 6249), et du programme LIEPPEC (LiDAR pour l'Etude des Paysages Passés et Contemporains) dirigé par Laure Nuninger (CR, UMR 6249).

1.2.3.1 Le PCR Mandeure (Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique : Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs))

Le projet collectif de recherche sur l'agglomération antique de Mandeure a débuté en 2001. La connaissance de l'agglomération antique de Mandeure-Mathay, site majeur de la Séquanie, souffrait de l'absence d'un véritable programme de recherche étudiant dans une perspective globale la naissance, le développement puis le déclin de l'agglomération d'*Epomanduodurum* considérée dans son contexte micro-régional.

Réunissant des chercheurs de Besançon, Strasbourg, Dijon, Paris et Lausanne, il vise à une compréhension globale du fonctionnement de la ville et de son espace micro-régional, suivant une démarche diachronique et pluridisciplinaire.

Il comprend deux orientations complémentaires :

- des études documentaires et thématiques portant sur les archives et fonds mobiliers anciens et récents,

- des recherches sur le terrain (prospections spécialisées, sondages et fouilles extensives), dont l'objectif est de progresser dans la connaissance du site, replacé dans son contexte territorial et environnemental.

La problématique scientifique du projet peut se résumer par une série de questions :

Quelle est l'importance de l'occupation préromaine ?

Quelles relations le site gaulois entretient-il avec les sites fortifiés de hauteur proches ?

Quel rôle le sanctuaire celtique joue-t-il dans la genèse de l'agglomération ?

Comment l'agglomération gallo-romaine se développe-t-elle et s'organise-t-elle à l'intérieur de la boucle du Doubs ?

Quelle est la part respective des facteurs naturels (notamment de la dynamique de la plaine alluviale) et des transformations humaines dans cette organisation ?

Suivant quels rythmes et quels processus s'est faite la mise en valeur du terroir d'*Epomanduodurum* ?

Quel est le statut civique et socio-économique exact de l'agglomération gallo-romaine ?

Peut-on caractériser et dater les différentes phases de rétractation du tissu urbain ?

Quelle place la fortification du Bas-Empire occupe-t-elle dans le réseau fortifié et civil de l'Antiquité tardive ?

1.2.3.2 Le programme LIEPPEC

Une partie des problématiques du PCR concernait la reconnaissance de l'espace micro-régional autour de l'agglomération Antique. Le projet Lieppec a été monté en partie pour étudier l'espace rural autour des agglomérations de Mandeure et Mathay.

Le LIEPPEC est une action méthodologique pluridisciplinaire articulée autour de la technologie laser aéroportée. Elle est pilotée par la MSHE USR 3124 CNRS/UFC et a été financée en 2008 par le Conseil Régional de Franche-Comté. Elle regroupe des archéologues, des géodésistes, des géographes, des médecins et des forestiers. Elle vise d'une part à développer les traitements nécessaires à la détection des micros et macrostructures signalant un aménagement anthropique et, d'autre part, à analyser ces structures d'un point de vue spatial et temporel dans le contexte plus large du cadre de vie des sociétés passées et actuelles (Fruchart *et al.*, 2011). Pour ce faire, deux zones ont été couvertes par une prospection laser aéroportée (fig. 11) l'une d'une superficie de 160 km² centrée sur Besançon, et l'autre d'une superficie de 81 km² centrée sur Mandeure. La pluridisciplinarité des participants à ce projet permet de travailler sur toute la chaine opératoire, du traitement des données brutes à la création de modèles de terrain ou de surface jusqu'à l'analyse des informations dérivées. Ces deux fenêtres ont été choisies par consensus entre les différents participants scientifiques au projet et les financeurs. Il fallait, par exemple, choisir des zones peu artificialisées pour les archéologues et des zones totalement urbanisées pour les médecins.

1.3 Dynamique de l'occupation

Traiter de la dynamique des occupations anciennes sur l'intégralité de la zone d'étude n'est pas une chose aisée dans la mesure où la définition de son périmètre, arbitraire, recouvre tout ou partie d'entités territoriales plus ou moins précisément reconnues et identifiées au plan archéologique ou historique. Les centres de gravité se déplaceront au fil du temps et il n'existe à l'heure actuelle aucune étude qui a tenté d'étudier cette zone dans sa globalité. De plus, la richesse et l'abondance des informations collectées varient fortement en fonction du lieu, des situations géographiques et de l'époque considérée.

1.3.1 La Préhistoire

L'inventaire partiel des sites préhistoriques du Nord Franche-Comté, dressé à la suite de recherches bibliographiques et de plusieurs programmes de prospection, a mis en évidence une occupation dense dès la période mésolithique (Passard, 1980). Dans « l'habitat au Néolithique et au début de l'âge du Bronze en Franche-Comté », Françoise Passard établit la liste des gisements mésolithiques reconnus de cette région (Passard, 1980). Parmi les sites recensés dans le périmètre de la fenêtre figurent « l'abri de Châtaillon » situé sur la commune de Bart et le site de hauteur de l'éperon barré de « Châtillon » situé sur la commune de Roches-les-Blamont (fig. 12)). De nombreux indices archéologiques ont été répertoriés pour la période néolithique, notamment sur les sites de hauteur de Châtaillon (commune de Bart) et de Châtillon (commune de Roches-les-Blamont) précédemment évoqués et qui continuent à être occupés. Néanmoins, aucune liaison stratigraphique n'a pu être établie avec l'occupation antérieure (Duvernoy, 1875 ; Passard, 1980). Les indices d'une occupation au Néolithique ont également été relevés aux camps du Mont Bart et du Mont Julien, deux sites de hauteur situés respectivement sur les territoires des communes de Bavans et de Pont-de-Roide (Duvernoy, 1875, Passard, 1980). De manière moins assurée, la bibliographie mentionne également l'existence d'un camp repéré au sud de Mandeure, au lieu-dit « le Châtelet », à l'extrémité septentrionale du plateau du « Lomont » (Haaz, 2009). A proximité de la limite occidentale de la fenêtre LIDAR, on peut signaler le petit camp du Massif de Montsepied, localisé sur la commune de Remondans.

1.3.2 La Protohistoire

L'un des plus anciens indices d'occupation retrouvé pour cette période dans notre zone est aussi l'un des plus spectaculaires : il s'agit d'un dépôt constitué d'environ 2500 éléments de parure en bronze, découvert au lieu-dit « Les Lochières » dans une forêt située au nord de la commune de Mathay. Ces objets peuvent être attribués au Bronze final (Barral *et al.*, 2011). Cette découverte, considérée comme isolée, appartenait très vraisemblablement à une personne de rang élevé. Dans la plaine alluviale du Doubs, les sources bibliographiques mentionnent l'existence d'une nécropole de l'Âge du Bronze au lieu-dit « l'Essarté » à Mathay (Augé, 1990). Par ailleurs, les sites de hauteur de Châtaillon (Bart), de Châtillon (Roches-les-Blamont), du mont Julien (Pont-de-Roide) et du mont Bart (Bavans) montrent encore les traces d'une occupation pour cette période (Duvernoy, 1867, 1871, 1872, Passard 1980).

A une échelle micro régionale, la période de l'Âge du Fer se caractérise par une occupation de différents camps de hauteur fortifiés répartis le long de la vallée du Doubs, entre Pont-de-Roide et l'Isle sur le Doubs. La plupart sont situés hors de notre fenêtre d'étude, ou à l'inverse inclus dans celle-ci, comme celui de Chatillon (Roches-les-Blamont), situé non loin de la vallée du Gland (fig. 13a). La localisation géographique de ces camps évoque clairement un contrôle sur les axes de communication de cette partie du pays de Montbéliard à cette époque (Millotte & Lambert, 1996 ; Barral *et al.*, 2007b).

Dans l'aire d'extension de l'agglomération gallo-romaine de Mandeure (250 ha), les témoins d'une occupation gauloise antérieure se multiplient pour les périodes de Tène moyenne et de la Tène finale (figure 13b). Il s'agit de fonds d'habitat découverts dans la partie interne de la boucle du Doubs et au nord-ouest (« Arbues » et « Comboles »), d'un espace funéraire partiellement reconnu au lieu-dit « Les Longues Raies » au sud-ouest et en rive gauche du Doubs et d'un complexe cultuel situé en rive droite, au « Clos du Château », à la base du méandre de Mandeure. (Barral *et al.*, 2007, Marc *et al.*, 2007). Les travaux récents de prospection terrestre et de fouille ont permis de mieux cerner l'extension des traces de l'occupation gauloise (Nouvel 2006, 2010). Ils montrent que les traces d'habitat apparues en rive gauche forment un ensemble plus cohérent et conséquent qu'en rive droite où l'essentiel des témoins laténiens sont certainement masqués par l'importante stratigraphie gallo-romaine qui les recouvre. La distribution de ces traces de part et d'autre du cours du Doubs et l'absence de traces d'ouvrage défensif confirmée par les prospections et les fouilles, laisse penser qu'une agglomération laténienne ouverte, associée à un grand sanctuaire, a bien précédé l'installation de la ville romaine (Thivet, 2008).

1.3.3 L'Antiquité

1.3.3.1 L'agglomération d'Epomanduodurum

La transition entre la période gauloise et l'époque antique est marquée par un réel développement de l'agglomération (Thivet, 2008) qui se traduit par de profondes modifications dans l'urbanisme de la cité. L'occupation humaine dans la région est à considérer en fonction des rapports vraisemblablement étroits entretenus à cette période avec la cité d'*Epomanduodurum*. Les récentes recherches ont permis de sérier assez finement cette occupation dans l'agglomération même (Thivet, 2008 ; Nouvel, 2010) même si une grande partie de l'agglomération antique n'a pu et ne pourra être explorée du fait de l'urbanisation actuelle des villes de Mandeure et de Mathay. Les informations archéologiques sur l'espace environnant sont, par contre, beaucoup plus lacunaires.

Les fouilles menées dans le cadre du PCR ont permis de caractériser des niveaux augustéens sur une grande partie des zones explorées, contrairement à la plupart des fouilles plus anciennes.

Le sanctuaire du « Champ des Fougères » (fig. 14) est créé à la période augustéenne sur un substrat artisanal laténien. Son premier péribole* en bois est remplacé par un mur en pierre au milieu du premier siècle (Thivet & Nouvel, 2009).

En rive gauche, les fouilles effectuées aux « Champs des Isles » (Mazimann, 1992) et aux « Avets » (Urlacher *et al.*, 1983) montrent des niveaux d'occupation clairement augusto-tibériens. Les fouilles réalisées en 2006 aux « Combolles » ont permis de caractériser une zone d'occupation composée d'installations légères sur poteaux (greniers), dont le comblement s'opère entre la période augustéenne et la fin du premier siècle (Thivet, 2006).

Les prospections pédestres menées juste au nord du pont routier, en rive droite, au lieu-dit « Champs du Puits » ont permis de découvrir du matériel céramique précoce. Celles menées juste au nord de cette zone et le sondage des rives du Doubs permettent d'attester la prolongation de la ville au Nord (Thivet, 2005 ; Nouvel, 2007).

A Mandeure, comme à Langres, Lyon ou Sens, l'époque tibéro-claudienne correspond à un accroissement des surfaces construites mais surtout au développement de la parure monumentale (Goudineau, 1998).

La période Claude-Néron connaît l'extension de la ville antique en direction de l'Est jusqu'au village de Mandeure (Mougin *et al.*, 2003) et une intensification de l'occupation en rive gauche (Nouvel, 2010). La berge en rive droite, qui servait auparavant de dépotoir, est aménagée comme un espace de circulation (Thivet, 2005). Le complexe monumental prend sa forme définitive en se parant d'un mur de clôture qui le sépare du tissu urbain durant la période flavienne. Les premiers indices d'occupation du quartier artisanal de « l'Essarté » apparaissent durant cette période, le long de la voie longeant le Doubs et menant vers le Jura. A l'Est, la ville semble s'étendre jusqu'aux thermes de « Courcelles » qui peuvent marquer la limite orientale de l'agglomération dans le fond de vallée.

La ville continue de croître pour atteindre son maximum de superficie durant le IIème siècle (fig. 14). Cependant, cette croissance ne conduira pas à former un ensemble urbain homogène, en effet, cette dernière est limitée par des zones inondables dans la plaine alluviale (Jeannin, 1986). Par exemple, aucun vestige archéologique ne permet d'assurer la continuité du tissu urbain entre « Faubourg de pont » et « l'Essarté ».

Les données relatives au IIIème siècle sont plus fragmentaires. Peu de niveaux d'occupation sont clairement datés de ce siècle à l'exception de ceux recensés à « l'Essarté » à la faveur d'un réexamen des sources (Fruchart, 2009) ou ceux reconnus par les sondages du diagnostic archéologique réalisé aux « Champs sous la grande Planche » près du théâtre antique (Barral *et al.*, 2005).

Le IVème siècle voit la rétraction de l'agglomération, les thermes de « Courcelles » semblent être abandonnés. Une fortification (*Castrum**) située au bord du Doubs, devient le nouveau centre de gravité de l'agglomération (Monnier *et al.*, 2007). Le quartier de « l'Essarté » semble être peu à peu abandonné (Fruchart, 2009). La parure monumentale publique est démantelée notamment pour l'édification du Castrum. Des blocs architecturaux provenant probablement des sanctuaires du « Clos du Château » et du « Champs des Fougères sont réutilisés dans le soubassement du mur d'enceinte. Une partie de l'emprise du sanctuaire des « Champs des Fougères » est d'ailleurs recoupée par le tracé du fossé défensif.

1.3.3.2 L'occupation de l'espace rural

Une première image de l'occupation de l'espace rural environnant l'agglomération antique est fournie par une compilation des données anciennes et récentes (rapports de fouilles, communication orales etc.) qui a révélé entre autres que les données sont disparates et de qualité très variable (Haaz 2009). Sur la base de cette compilation et des zones prospectées au cours du PCR, la figure 15 localise les principaux établissements ruraux repérés dans la zone d'étude.

A Valentigney, dans le « Bourg », un riche établissement rural antique livrant des éléments de mosaïque et du mobilier du IIème au IVème siècle a été repéré (1 fig.15) (Haaz, 2009). Sur la même commune, aux lieux-dits « Sous le Chêne » et « Les Tales », un établissement rural de statut moyen a été partiellement reconnu au XIXème. L'exploration du site reprise à la faveur d'une fouille de sauvetage en 1994 montre que son occupation remonte à la période laténienne et perdure jusqu'à la fin du IVème siècle (2) (Ganard & Vaxellaire, 1994). Les constructions antiques des Ier et IIIème siècles détruites non loin de là, à « Pézole », lors de la construction d'un lotissement en 1964, pourraient matérialiser un bâtiment annexe du site précédent.

A Voujeaucourt, aux « Carons » il est fait mention d'un petit établissement rural du Haut Empire découvert lors de la construction de l'échangeur de l'autoroute A36 (3). A Mathay, à « La Chapelle Saint-Symphorien », un établissement rural antique a été repéré en rive gauche du Doubs, au pied du coteau qui borde le nord de l'agglomération (4). Sur la même commune, un autre établissement, de taille modeste (5), fonctionnant durant les périodes laténienne et romaine, a été découvert aux « Noires terres » lors du percement d'une carrière sur le versant ouest de la vallée (Haaz, 2009).

Plus au sud, trois sites sont mentionnés sur la commune de Bourguignon. Celui des « Arrues », situé dans une petite vallée entaillant le plateau calcaire (6), correspond à un établissement rural de statut vraisemblablement modeste ayant fonctionné de la fin de la période laténienne jusqu'au IIIème siècle (Bossuet *et al.*, 2010). Dans le bourg actuel de Bourguignon (7), de nombreuses découvertes indiquent la présence d'un riche établissement antique (Haaz, 2009). Enfin, au sud-est de ce même bourg, à « Derrière la Pagre » (8), un établissement antique, mal caractérisé, a livré du mobilier céramique et métallique du Haut Empire et de l'Antiquité tardive (Haaz, 2009).

Tout au nord-ouest et en limite de la fenêtre LiDAR, les sources mentionnent la découverte d'un petit établissement du Ier et IIème siècle au sud du bourg d'Etouvans (9) (Joan, 2003). A l'opposé, sur un éperon qui domine la vallée du Doubs, un autre établissement rural, relativement modeste, et fréquenté au Haut Empire, a été repéré sur la commune de Mandeure aux lieux-dits « Grand Champs de Vaivre » et « Champ d'Anarey » (10) (Joan, 2003 ; Haaz, 2009). Enfin, à Vermondans, la construction en 1967 non loin du Doubs, de l'usine *Savreux Clausse* (11) a occasionné la destruction des mosaïques et d'éléments de balnéaire d'un riche établissement antique dont la durée d'occupation n'a malheureusement pas pu être précisée (Haaz,2009).

1.3.4 Le Moyen Age

Dans le cadre du PCR, il est apparu nécessaire de poursuivre les recherches sur la dynamique du peuplement bien au-delà de l'Antiquité tardive afin de pouvoir étudier les mutations de l'agglomération jusqu'aux premiers siècles du Moyen Age. Les monnayages établissent en effet que l'occupation se poursuit notamment dans le *Castrum* jusque vers le milieu du VIème siècle (1 fig. 16). La mention de la ville dans deux chartes du VIIIe siècle sous la forme de l'emploi du mot *castrum* implique l'existence d'un bourg fortifié, encore siège de pouvoir à cette époque (Billoin, 2010). Par ailleurs, une monnaie du XIème siècle témoigne d'une occupation très tardive à cet endroit. Il semble que la création du Comté de Montbéliard autour des Xème et XIème siècles ne soit pas étrangère à la perte d'importance de Mandeure (Billoin, 2010).

La figure 16 montre que les localisations des traces d'occupation au Haut Moyen Âge sont diffuses et se situent principalement à l'intérieur du méandre du Doubs, en différents points de l'agglomération antique (Billoin, 2010). Ces traces d'occupation concernent principalement la découverte de sépultures et de sarcophages des VIème au VIIIème siècle retrouvés en position isolée comme au théâtre antique (2) (Tchirakadzé, 1983) ou également rue de la Récille (12) ou encore groupées en nécropole dans la boucle du Doubs, le long de la voie antique « Rue de la Papeterie » (10), à « l'église Saint Martin », au « Moulin » (13), et à « Beaulieu » (14) ou alors en rive gauche comme à « Faubourg de Pont» (15) et plus au sud à Mathay à « Le long de la vie Paule » (16) .

En dehors du *Castrum* (1), les contextes d'habitat (2) et (12) s'observent aux endroits où des sépultures isolées ont été retrouvées (Théâtre, rue de la Récille) mais également en rive gauche du Doubs « Le long de la vie Paule » (16) et près de la station de pompage (17), où des traces d'occupation beaucoup plus anciennes ont été également identifiées (*cf. supra*).

A l'échelle microrégionale, on peut mentionner la découverte de mobilier métallique (scramasaxe à large lame, petite hache en fer, ferret rectangulaire) à Mandeure sur le haut de la colline au sud du théâtre, au lieu dit « le Châtelet » (3). Ce mobilier est à mettre en relation avec des sépultures mérovingiennes (Guillot 1999 ; Billoin, 2010).

Plusieurs sites d'habitats fortifiés, de hauteur ou de plaine, sont recensés dans notre zone d'étude, avec des datations plus ou moins assurées. Il s'agit, sur la commune d'Ecurcey, du site de « Chamabon » (4), petit hameau médiéval structuré autour d'une enceinte fortifiée et détruit en 1438 et dont la tour pourrait avoir été d'origine romaine (Haaz, 2009) et sur la commune de Valentigney, le site du « Bannot » (5), enceinte médiévale en forme de « U » renversé de 100 m sur 50, adossée à une falaise bordant le plateau. A la latitude du hameau de Chamabon et à l'est de celui-ci, l'ancienne seigneurie de Blamont, dont dépendait ce petit village possédait un château. A l'opposé de ce site, mais hors dela fenêtre, se localise le château de l'ancienne seigneurie de Neufchâtel (7). Dans la plaine du Doubs, les sites fortifiés répertoriés sont ceux de la maison forte de « La Combe » à Mathay (8) construite à la fin du XIIIème, détruite en 1344, et des deux maisons fortes de « La Papeterie » à Mandeure (10), édifices contigüs respectivement construits au XIIIème par Jean de Mandeure, vassal du Comte de Montbéliard et par l'archevêque de Besançon. Toujours à Mandeure, on signalera, sans plus de

certitude, la mention faite par Dunod de l'existence d'un château (9) localisé juste au dessus du théâtre antique (Dunod, 1709). Tout au sud enfin, le site du Mont-Julien (11) continue d'être occupé à cette période, comme le montre le résultat des fouilles clandestines qui ont révélé la présence d'une église datée de l'époque mérovingienne ainsi que les restes de nombreux aménagements aux abords du site (Haaz, 2009).

Ce bref aperçu des données archéologiques documente principalement le haut Moyen-Age. Les recherches conduites dans ce secteur géographique ont un caractère très disparate qui rend hasardeux l'établissement d'une carte de l'occupation pour le Moyen Age. Les recherches menées dans le cadre du PCR permettent pour l'instant de discerner l'évolution de l'agglomération de Mandeure postérieurement à l'Antiquité tardive (Billoin, 2010), alors que la région environnante demeure mal connue archéologiquement pour l'ensemble de la période médiévale.

1.3.5 L'époque Moderne

L'apparition et la multiplication des documents cartographiques au cours cette époque facilite grandement l'étude des traces matérielles d'occupation dans la zone d'étude. Grâce à la bibliothèque numérique de la Bibliothèque Nationale de France (BNF), nous avons pu avoir accès à de nombreuses cartes permettant d'appréhender dans la fenêtre l'évolution du peuplement et l'organisation du paysage du XVIIème siècle jusqu'à la fin du XIXème siècle, aux réserves près que l'on exprimera ultérieurement sur la précision de leurs relevés et l'exactitude des informations qui y sont figurées.

L'extrait de la carte de 1692, issu de « La Franche-Comté divisée en trois grands baillages » d'Alexis-Hubert Jaillot, représente une partie du comté de Montbéliard (fig.17). Sur cette carte, on observe que le Doubs sert de limite entre le baillage de Baume et le comté de Montbéliard. La zone d'étude était donc séparée en deux entités politiques au moment de l'établissement de la carte. Si l'on suppose que la taille du figuré de chaque ville et la typographie de leur nom correspond à leur importance, on observe que les deux plus gros villages, outre Montbéliard, sont ceux de Blamont (BLANMONT) et de Mandeure.

Dans notre cas, l'étude de la carte de Cassini du XVIIIème apporte de plus grandes informations pour peu que l'on s'intéresse au figuré. Sur cette carte (fig. 18), le hameau de « Chamabon », noté 1, apparaît d'après la légende comme un château en ruines (tour penchée surmontée d'une oriflamme), de même que les maisons fortes de Mathay (2) et de Mandeure (3). Le Château de Blamont est uniquement indiqué sur la carte par la mention « ruine ». Par contre il n'est pas fait mention de l'enceinte du Bannot à Valentigney, ni du « château » évoqué par Dunod au dessus du théâtre de Mandeure.

Faut-il en conclure que les sites non mentionnés n'existaient déjà plus et n'étaient plus visibles à l'époque où la carte a été dressée ? Il paraît hasardeux en tout cas de tenter de dater relativement l'abandon des sites en fonction de leur absence ou leur présence sur ce type de document.

Le cadastre ancien, dressé au début du XIXème siècle, montre que la zone dans son ensemble est encore très rurale, avec peu de forêts mais par contre de grandes zones ouvertes (fig. 19). Les zones de peuplement bien circonscrites ne dépassent pas au plus la taille de gros villages que ce soit dans le

fond de vallée ou sur les plateaux. La représentation de l'occupation du sol selon sa nature (champ, forêt, zone urbaine, vignes, vergers,…) a été construite à l'échelle du microtoponyme à partir du figuré aquarellé des bois représenté parfois sur les feuilles de sections et à partir des mentions manuscrites (par exemple : « *Lab* » pour labour, « Pat » pour pâturage, …) crayonnées soit sur le plan parcellaire de ces mêmes feuilles sections, soit sur leur plan d'assemblage.

Cette prédominance agricole structurée autour de petits villages décline lentement dans le fond de vallée pour céder progressivement la place à une urbanisation en relation avec l'installation et le développement des premières usines, Cycles Peugeot par exemple, dont l'une des annexes se trouvait à Mandeure. Sur les plateaux, là où les zones urbanisées s'étendent peu, ce sont les espaces boisés (plantations) qui gagnent au détriment des zones ouvertes.

Deuxième partie

Matériel et méthodes utilisés

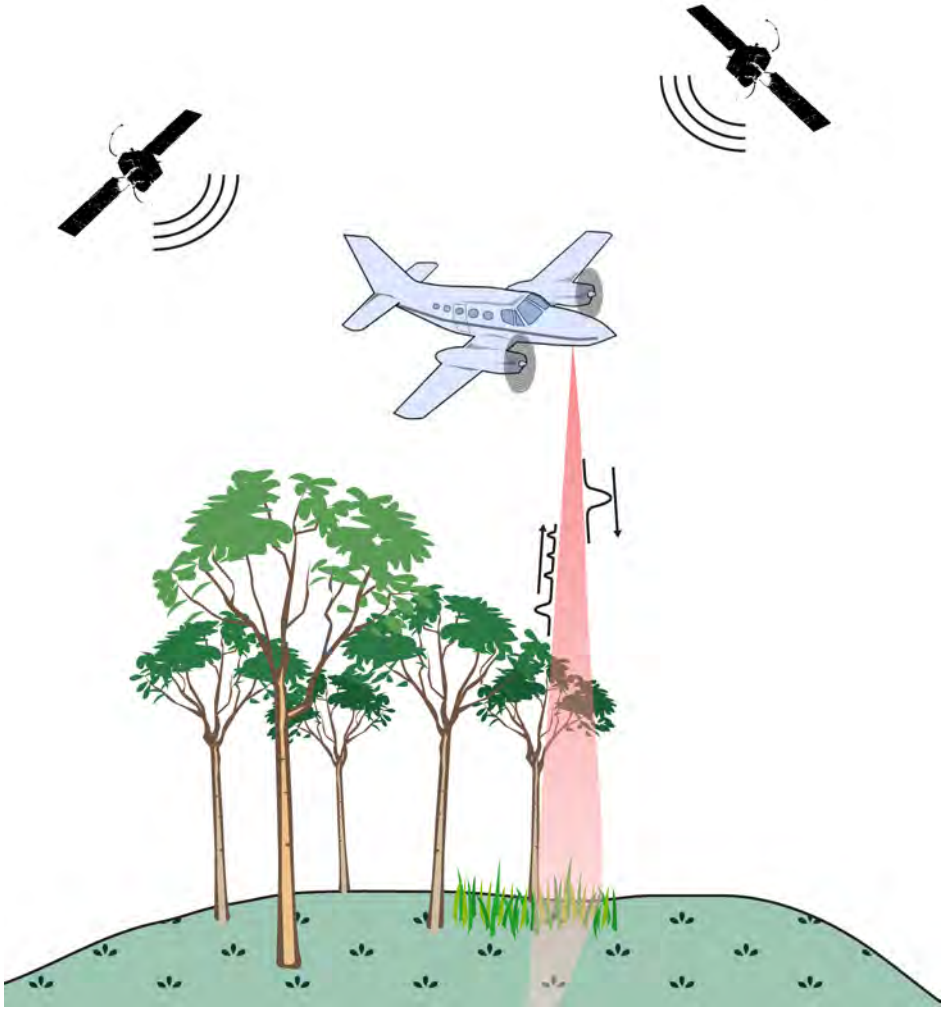


Illustration de la couverture de la deuxième partie :

Représentation schématique d'une prospection LiDAR aéroportée. (C.Laplaige, 2011)

2. Matériel et méthodes utilisés

Il s'agit, dans ce travail, de comparer l'apport combiné de différentes méthodes de prospection aux recherches sur le paysage en analysant notamment leur contribution à la reconnaissance des traces matérielles de l'empreinte humaine (voies anciennes, anciennes structures agraires, habitat, etc.), visibles à la surface du sol (LiDAR, photographie aérienne) ou détectables dans le proche sous-sol (géophysique appliquée).

La réalisation de ce bilan comparatif demande que soit précisé, dans cette seconde partie, les principes sur lesquels se fondent ces différentes méthodes de prospection, les conditions particulières de leur mise en œuvre et l'exploitation de leurs données, ainsi que leurs limites de détection aux différentes formes de l'activité humaine et naturelle.

L'interprétation des traces matérielles reconnues par l'approche prospective, en ce qu'elle renseignait sur l'organisation de l'espace et sur les types et les formes de paysages, imposait de recenser également, dans les limites de notre fenêtre géographique, les principales sources documentaires disponibles sur lesquelles fonder l'histoire du paysage, d'en souligner la variété mais aussi les biais. De plus, il était nécessaire de délimiter le champ de visibilité des différentes sources exploitées et d'expliquer en quoi le croisement de ces sources et de ces méthodes à partir d'un Système d'Information Géographique (SIG) permettait d'étudier, de notre point de vue, le paysage de manière plus efficace en abordant et en approfondissant de nouvelles thématiques.

2.1 Les documents cartographiques et les sources manuscrites

Les documents de l'analyse morphologique des paysages

Un grand nombre d'outils, de natures, de formes et de résolutions spatiales très différente, sont capables de révéler, à petite et/ou à grande échelle dans le paysage actuel, tout ou partie des formes de l'espace ancien et des traces matérielles d'occupation qui leurs sont associées. La documentation à partir de laquelle est abordée l'analyse morphologique des paysages englobe les sources cartographiques et manuscrites (Perpillou, 1979 ; Durand, 2003 ; Watteaux, 2009 ; Dupouey *et al.*, 2007). Les sources cartographiques, qui comprennent plans et cartes anciens pour la plupart, donnent une image ou une évocation d'un lieu à un moment donné mais toujours suivant leur propre finalité : représenter des itinéraires, délimiter des propriétés ou en schématiser les ressources, etc., à un moment donné. Les méthodes de détection dites « modernes » renseignent sur l'état actuel du paysage, indépendamment de ces objectifs sociaux. Le système d'information géographique perrmet d'analyser, de confronter et de combiner les différentes sources et méthodes utilisées dans l'étude du paysage tout en offrant des outils performants d'analyse spatiale.

2.1.1 Les cartes

Ces documents cartographiques sont de forme et de date variés. Les cartes antérieures au XVIIIème siècle, compilations de sources diverses, peuvent renseigner, d'une part sur l'habitat, en mentionnant par exemple des éléments remarquables du paysage bâti comme les châteaux, les maisons fortes et

d'autre part sur le paysage administratif, politique ou religieux en figurant les limites géographiques de bailliage, de généralité, de diocèse, etc..

2.1.1.1 Les itinéraires routiers de la fin du XVIIIème siècle

Parmi les cartes de la fin du XVIIIème siècle, nous avons pu exploiter celles des itinéraires routiers, consciencieusement dessinées à l'encre et aquarellées entre 1765 et 1769 sous la direction de l'ingénieur en chef des Ponts et Chaussées Henri Frignet.

Ces cartes, dont un extrait est représenté figure 20, permettaient aux ingénieurs des Ponts et Chaussés d'avoir une vision claire de l'état des voies principales du réseau routier de Franche-Comté. Elles étaient basées sur le même principe que « l'atlas de Trudaine », qui n'a pu être mis en œuvre en Franche-Comté du fait de son annexion récente au Royaume de France. Ces cartes sont d'une grande précision, mais elles se limitent au réseau routier principal et à la présence de villages, de vignes et de forêts. De plus, la représentation du couvert végétal est faite à partir du champ de vision du cartographe depuis la route, par conséquent les éléments du paysage (massifs boisés, vignes) « cachés » à la vue par les premiers plans (rideau d'arbres, variations du relief) n'apparaissent pas sur la carte.

2.1.1.2 La carte de Cassini

Nous avons également géoréférencé et utilisé la portion de la carte de Cassini correspondant à la zone d'étude. Plus ancienne carte topographique établie pour l'ensemble de la France (fig. 21), elle a été la première à bénéficier d'une triangulation générale à l'échelle d'un pays assortie d'un relevé de terrain systématique. Réalisée par la famille Cassini entre 1756 et 1793 à l'échelle de 1/86400^{e}, elle représente l'habitat, le relief, l'hydrographie, les principales routes, les zones boisées, les vignes, les moulins, les églises, les abbayes et d'autres éléments remarquables du paysage bâti, ainsi que les ruines (juste au sud-est du village de Mathay, fig. 21).

Toutefois, certains des éléments du paysage, même figurés schématiquement sur la carte, doivent être exploités avec précaution : le couvert végétal et l'hydrographie notamment ne sont pas représentés en détail, par conséquent les massifs forestiers de superficie inférieure à 250 ha (Dupouey *et al.*, 2007) et les petits cours d'eau n'apparaissent pas sur ce document, pas plus d'ailleurs que les chemins et le réseau viaire de moindre importance. Le parcellaire quant à lui n'est pas du tout représenté. A ces inconvénients s'ajoute l'imprécision de la représentation géométrique de la carte, liée à des relevés de terrains pas toujours minutieux. Le calage de cette carte sur SIG n'est donc pas des plus aisés.

2.1.1.3 Les cartes d'Etat-Major

Ces cartes ont été réalisées au XIXème siècle à des fins militaires pour pallier les imprécisions de la carte de Cassini. Les levés furent effectués à l'échelle du 1/40000^{e} en couleur entre 1818 et 1866, mais la carte fut d'abord publiée à l'échelle de 1/80000^{e} en noir et blanc entre 1833 et 1880. Elle offre une vision globale très détaillée et homogène du paysage puisqu'elle fait figurer les routes, la végétation, l'hydrographie, les bâtiments et la topographie.

Par contre, le parcellaire n'est pas indiqué et la représentation par hachure de l'orographie limite dans certaines zones la lisibilité (fig. 22). Les cartes d'état major ont constitué un complément utile du cadastre napoléonien (*cf. infra*), daté de la même époque, avec lequel elles se combinent parfaitement.

2.1.1.4 Les cartes modernes, le XX^{ème} siècle

Depuis quelques années l'Institut Géographique National (IGN) fournit des cartes au format raster*, constituées d'un ensemble de pixels* et de cartes vectorisées, c'est-à-dire composées d'objets géométriques paramétrables. Elles sont de plus en plus accessibles et gratuites pour les chercheurs comme pour le grand public. A ce type de carte s'ajoutent quelques produits payants. Bien sur, l'intégralité des produits IGN n'est pas détaillée, mais nous allons citer ceux que nous avons utilisés :

- la BD Carthage©, qui est la base de données du réseau hydrographique français

- la BD Carto©, contenant les réseaux routiers et ferrés, les unités administratives jusqu'à l'échelle de la parcelle, le réseau hydrographique, l'occupation du sol, la toponymie et les équipements divers comme le réseau électrique.

- la BD Alti©, qui est une base de données altimétriques dont est dérivée une gamme de Modèles Numériques de Terrain et isohypses qui décrivent à différentes résolutions le relief du territoire national.

- le Scan 25®, qui est une image cartographique numérique géoréférencée identifiant les éléments naturels, les voies de communication, l'hydrographie et les points d'intérêts.

- Les cartes géologiques de Delle et de Montbéliard ont été utilisées (n° 474 et 475 ; BRGM, 1973 ; Chauve *et al.*, 1985), comme le fond Corine Land Cover (cf. partie 1.2) qui renseigne sur la nature de l'utilisation du sol depuis 1990 et enfin la *Carte Archéologique de la Gaule* (CAG) du Doubs (Joan, 2003).

2.1.2 Les plans et les sources manuscrites

La différence principale entre la carte et le plan tient à la différence d'échelle, généralement petite pour la première et grande pour le second. Les cartes renseignent sur des éléments du paysage qui ont un modelé et une fonction à un instant donné, sur des formes de découpage et d'appropriation du sol pas forcément matérialisées (administratif, foncier), sur des critères discriminants de l'espace comme les microtoponymes des lieux-dits et l'orographie.

Les plans sont établis non pas pour avoir une vision d'ensemble d'un espace mais pour représenter un caractère défini sur une surface donnée. Cette catégorie « plan » regroupe ici les plans cadastraux, les plans de fouilles, la répartition des vestiges. Bien que ces plans se révèlent d' une plus grande finesse que les cartes, ils ne sont pas dénués d'imprécisions (que nous avons identifiées) et d'approximations ou de contradictions taxonomiques (Watteaux, 2009).

2.1.2.1 Le cadastre napoléonien

Le plan cadastral napoléonien ou ancien cadastre est un cadastre parcellaire unique et centralisé, institué en France par la loi du 15 septembre 1807, à partir du « cadastre-type » défini le 2 novembre 1802. Cet outil juridique et fiscal permettait d'imposer équitablement les citoyens aux contributions foncières. Il fut levé par les méthodes de l'arpentage et fut révisé par la loi du 16 avril 1930.

Un arrêté du 12 Brumaire an XI prescrivit d'étendre ces travaux à toutes les communes, puis une instruction ministérielle de 1805 ordonna de faire des expertises parcellaires à l'aide des plans par masses de culture.

Des commentaires de la loi du 15 septembre 1807 indiquent qu'il était destiné à *« mesurer sur une étendue de plus de sept mille neuf cent et un myriamètres carrés plus de cent millions de parcelles… ; confectionner, pour chaque commune, un plan où sont rapportées ces cent millions de parcelles, les classer toutes d'après le degré de fertilité du sol, évaluer le produit imposable de chacune d'elle ; réunir au nom de chaque propriétaire les parcelles éparses qui lui appartiennent ; déterminer, par la réunion de leur produits, son revenu total et faire de ce revenu un allivrement qui sera désormais la base de son imposition… »*

Dans la zone d'étude, le découpage parcellaire tel qu'il est figuré sur ces plans a perduré quasiment sous sa forme initiale jusqu'au début de la seconde moitié du XXème siècle où il a été profondément modifié par le remembrement.

Pour ce travail, nous avons numérisé, assemblé et géoréférencé 215 feuilles qui correspondent aux parties des plans cadastraux incluses, pour ces vingt communes, dans l'emprise de la fenêtre LiDAR. Les feuilles ont été découpées en suivant leur limites afin d'obtenir, d'une section à l'autre, une continuité dans le dessin des parcelles sur toute la fenêtre d'investigation (fig. 23).

L'échelle de ces plans peut varier entre le 1/2500^{e} et le 1/1000^{e} en fonction de la densité des parcelles à représenter. La valeur informative de ce document est très élevée, car il représente pratiquement tous les détails du paysage du début du XIXème siècle selon une représentation planimétrique très précise : le bâti, le réseau viaire avec son statut (route, sentier, chemin d'exploitation etc…), les microtoponymes des lieux-dits, la nature de l'exploitation des parcelles, le degré de fertilité du sol (consignés dans l'état des sections), l'hydrographie (ruisseaux, mares, fossés, canaux, biefs) et des indications diverses telles que les calvaires, les fontaines, chapelles, cimetières, etc… Le cadastre napoléonien apparaît comme le document le plus adapté à la recherche morphologique (Aubry, 2003 ; Robert, 2003 ; Noizet, 2007).

Par contre, l'orographie n'est pas représentée sur les feuilles des différentes sections du plan cadastral, mais elle est schématiquement figurée sur le tableau d'assemblage au 1/10 000^{e} qui présente l'ensemble des sections, les lieux-dits principaux et les routes à l'échelle de la commune. Sur vingt communes dépouillées, nous avons seulement pu numériser les tableaux d'assemblage de trois communes (Mandeure, Etouvans et Dampierre-sur-le-Doubs) les seuls à être encore conservés sous forme de feuilles volantes aux Archives Départementales du Doubs.

La confrontation du plan cadastral napoléonien avec la carte d'Etat-major du début du XIXème siècle et avec la carte archéologique permet d'attester de la pérennité, dans le découpage du parcellaire moderne et dans la topographie, de certains éléments (réseau viaire,…) qui structurent le paysage à des périodes plus anciennes (Moyen Age, Antiquité) (Bossuet *et al.*, 2007, Thivet *et al.*, 2009).

Géoréférencement des feuilles cadastrales

Afin de ne pas déformer les images, le géoréférencement des feuilles du cadastre ancien a été effectué en utilisant uniquement trois points de calage sur les limites de sections des feuilles cadastrales actuelles. Lorsque le géoréférencement des feuilles était de trop piètre qualité, nous avons utilisé une autre méthode, basée sur au moins neuf points de calage et une transformation polynomiale de premier ordre effectuée à partir de points de repères situés, soit en limite de feuilles, soit en limite de lieu-dit.

2.1.2.2 Les plans de fouilles anciens

Ces plans mentionnés dans la première partie, sont en grande partie l'œuvre de François Morel Macler et de Clément Duvernoy (XIXème siècle). Les plans des sites sont très souvent remarquables par la finesse de leur représentation et leur précision, mais les plans d'ensemble posent de réels problèmes de géoréférencement dès lors qu'ils intéressent le relevé topographique de structures dispersées sur de grandes étendues comme par exemple le plan de l'agglomération antique de Mandeure publié en 1893 par la SEM. Une autre réserve à émettre à l'encontre de ces plans concerne la pertinence de l'interprétation archéologique, étroitement dépendante des connaissances et des méthodes utilisées à l'époque comme l'illustre le cas du sanctuaire des « Cloux du Château » interprété initialement comme un marché aux chevaux ou celui des thermes de « Muraillebourg » assimilé d'abord à un temple de Neptune.

2.1.2.3 Les plans divers

Dans le cadre de ce travail, nous avons pu avoir accès en nous rendant aux Archives Départementales du Doubs, à un certain nombre de plans inédits documentant ponctuellement notre zone d'étude. Ces plans présentent un format, un état de conservation et une valeur informative très variables selon le lieu. La difficulté majeure rencontrée dans l'utilisation de ces sources tenait au fait que la plupart de ces documents cartographiques ne sont pas encore triés ni précisément inventoriés, empêchant ainsi de connaître toute la richesse de ce fond d'archives et limitant les possibilités de son exploitation thématique.

2.2 Les méthodes de détection

De façon plus ou moins conventionnelle, les méthodes de détection peuvent être classées en deux catégories, méthodes dites « externes » et méthodes dites « internes », selon que leur mode de reconnaissance intéresse l'exploration du sol en surface ou en profondeur.

Les méthodes dites « externes » impliquent l'existence, hors du site ou à sa surface, de manifestations visuelles, de traces matérielles d'occupation que l'on peut soit observer (reconnaissance à vue) et échantillonner directement sur le terrain (collecte superficielle d'objets erratiques), soit enregistrer (photographie aérienne) ou bien alors mesurer depuis un avion (LiDAR aéroporté).

Les méthodes dites « internes » recouvrent essentiellement celles qui sont issues des applications de la géophysique ; elles ont pour caractéristique d'assurer la détection de structures enfouies à partir de mesures effectuées à la surface d'un sol qui peut éventuellement masquer leur présence par un recouvrement. Ceci implique que ces structures présentent, par rapport au milieu qui les enrobe, un contraste de propriétés (électrique, magnétique, thermique…) suffisant, sous certaines conditions géométriques de profondeur et de taille imposée par les limites physiques du principe de mesure et par l'état de la technique opératoire, pour produire en surface une perturbation (ou anomalie*) décelable par rapport à la répartition uniforme qui serait observée sur un terrain homogène (Hesse *et al.* 1978 ; Hesse 1985).

Dans cette catégorie des méthodes internes sont incluses les méthodes dites « d'observation directe » (forage, sondage, fouille) qui, à l'inverse des méthodes de la géophysique appliquée, consistent en une exploration destructive et plus ou moins ponctuelle du sol.

2.2.1 Les méthodes « internes »

2.2.1.1 Les méthodes géophysiques

Les résultats de prospections géophysiques présentées ont été ceux acquis durant cette thèse, mais également ceux obtenus auparavant durant les années 2001-2009 à la faveur d'investigations conduites autour des problématiques de recherche du PCR Mandeure. Leur finalité commune est d'obtenir rapidement des informations sur la nature et la structure des matériaux présents dans le sous-sol en mesurant des contrastes de leurs propriétés physiques. Ces contrastes peuvent être suffisamment importants pour être mesurés à la surface et ainsi être cartographiés, que ce soit en coupe (les panneaux électriques, les inversions de profils magnétiques par exemple) ou en plan. Ces contrastes, ou anomalies, permettent de remonter jusqu'à la structure et ainsi de modéliser sa forme, sa composition et sa position. Nous développerons ici les différentes méthodes employées autour du site de Mandeure en décrivant synthétiquement leur principe et leur mise en œuvre. Cette présentation est effectuée en référence aux ouvrages complets et bien documentés d'Irwin Scollar (Scollar *et al.*, 1990), John M. Reynolds (Reynolds, 1997) et de William M. Telford (Telford *et al.*, 1990).

2.2.1.1.1 Les méthodes électriques à courant continu

Historique

Les premières prospections électriques à finalité archéologique ont été menées en 1946 par Atkinson (Atkinson, 1952, 1953) sur un cromlech* du Dorchester en Angleterre. Elles permettront, en utilisant un courant continu, de mesurer la résistivité électrique du sous sol, c'est-à-dire la difficulté pour le courant à passer et à circuler dans ce dernier.

Principe et équipement

La résistivité électrique ρ dépend de la résistance R en Ohm mais aussi des dimensions du corps mesuré. La valeur de la résistance électrique R est fonction de la teneur en eau dans les matériaux du sous sol, de la minéralisation de cette dernière, de la teneur en argile et de la granulométrie (Astier, 1971). Par exemple, pour un cylindre de longueur L et de section A, nous obtenons :

$$\rho=R* A/L \ (\Omega.m)$$

Avec $R=V/I$ avec V le potentiel en Volt et I l'intensité du courant en Ampère.

Mais pour calculer ce potentiel, il est nécessaire d'introduire la densité de courant, qui est égale au courant par unité de surface traversée : $\vec{J}=\vec{I}/A$ (A/m^2). Le courant se diffuse dans le sous sol suivant une demi-sphère de rayon r, alors $A=2\pi*r^2$

Cette densité de courant peut être reliée au champ électrique par la formule :

$$\vec{J}=(1/\rho)*\vec{E} \ (A/m^2)$$

Si dans l'équation précédente, la densité de courant est remplacée par I/A alors :

$$\vec{E}=\rho*I/(2\pi r^2) \ (V/m)$$

Sachant que le champ électrique est un vecteur dérivant du potentiel électrique par l'intermédiaire d'un gradient soit $\vec{E}=-\vec{grad}\ V$ on obtient : $V=\rho I* 1/(2\pi*r)$ (volt)

Ce potentiel est généré par un courant de faible intensité (quelques milli ampères) injecté dans le sol.

Sur le schéma figure 26, nous avons représenté deux électrodes d'injection du courant (A, B) et deux de mesures (M, N). Le potentiel au point M sera égal à :

$$V_M=\rho I/2\pi*(1/R1-1/R2) \ (volt)$$

La différence de potentiel aux électrodes de mesures sera égale à :

$$\Delta V_{MN}=(\rho I/2\pi)* (1/R1-1/R2-1/R3+1/R4) \ (volt)$$

$$\rho=K (\Delta V_{MN})/I \ \ (\Omega.m)$$

Où K est appelé coefficient géométrique du dispositif. Ce paramètre est primordial car il permet de normaliser les résistances mesurées en fonction du dispositif.

La figure 27 présente les résistivités habituellement observées dans les matériaux du sous-sol. On constate au vu des variations enregistrées qu'il est aisément possible de discriminer, à partir de la mesure de la résistivité du sol, les formations géologiques entre elles mais également de déceler, dans les applications à l'archéologie, la présence des structures en «dur» (pierres, maçonneries,...) et celle des structures «en creux» de type remblais ou fossés.

Matériaux	Résistivité (Ω.m)	Résistivité les plus fréquentes (Ω.m)	Conductivité (mS/m)
Argiles	5-10	10	100
Argiles indurées	20-1000	100	10
Sables	50-400	60	16
Graviers	150-500	200	5
Calcaires	100-10000	2000	0.5
Dolomites	350-5000	1000	1
Grès	30-10000	1000	1
Sables de rivière et graves	10-7000	1000	1
Alluvions	10-800	50	20

Figure 27. Exemples de valeurs de résistivité et de conductivité pour différents matériaux (Meyer de Stadelhofen, 1991)

Les démonstrations précédentes ne considéraient qu'une seule couche homogène. Pour prendre en compte l'hétérogénéité du sous sol, on introduit la notion de « résistivité apparente » qui correspond à la résistivité d'un sous-sol homogène pour lequel on mesurerait les mêmes valeurs de potentiel. Les variations latérales et/ou verticales de résistivités peuvent être mesurées et cartographiées puis interprétées comme structure d'origine archéologique ou naturelle.

Mise en œuvre

Plusieurs techniques de prospection ont été mises en œuvre dans le cadre des recherches sur le territoire de Mandeure-Mathay (Bossuet *et al.*, 2002 ; Bossuet & Thivet, 2006 ; Thivet 2008) :

Des sondages électriques, dispositif Schlumberger, ont été réalisés à intervalle régulier dans des zones de contact entre différentes terrasses alluviales dans le but de caractériser la stratigraphie de ces milieux de dépôts à partir de la reconnaissance de la succession des résistivités rencontrées à la verticale d'un point de mesure.

Des prospections basées sur la mesure des variations latérales de résistivité à profondeur définie, autrement appelées traîné électrique, ont été réalisées dans le but de cartographier les aires d'extension des vestiges de l'agglomération antique. La quasi-totalité de ces prospections ont été effectuées par la société Géocarta© avec un dispositif automatisé de mesure dénommé ARP (Automatic Resistivity Profiling) (Dabas *et al.*, 2006), dispositif lui-même dérivé des prototypes RATEAU (Résistivimètre Auto Tracté à Enregistrement Automatique (Hesse, 1986 ; Dabas et *al*. 1989) et MuCEP (Multi Depth Continuous Electrical Profiling, (Panissod, 1997, 1998). Le nouveau dispositif (breveté) est composé

d'un dipôle émetteur de courant électrique en tête suivi d'une série de trois dipôles récepteurs mesurant le potentiel électrique, résultat de la circulation du courant dans le sol (fig. 28).

Les écartements croissants des dipôles, correspondant à la distance émetteur-récepteur (50 cm, 1 m, 2 m) permettent d'intégrer des volumes croissants de sol et par extension des profondeurs de plus en plus importantes (environ 50 cm, 1 m et 1,7 m). Le courant utilisé pour l'injection peut varier de 0,1 à 20 mA. Les roues sont dentées afin d'injecter le courant et de mesurer le potentiel électrique. Ces roues sont disposées en « vol de canard ». L'ensemble des données est géoréférencé instantanément grâce à un *dGPS Starfire* bifréquentiel. Le système permet de réaliser simultanément trois mesures de résistivité apparente au pas de 20 cm quel que soit la vitesse d'avancement. Ainsi, en réalisant des profils espacés de 1 m dans une parcelle, le dispositif permet d'acquérir plus de 150 000 mesures de résistivité par hectare. Le tout est tracté par un quad qui avance à une vitesse d'environ 10 km/h.

Cette méthode de prospection permet de cartographier plusieurs dizaines d'hectares en peu de temps et à trois profondeurs simultanément.

La dernière technique de prospection mise en œuvre est la tomographie électrique. Elle permet d'obtenir des pseudo-sections de résistivité apparente, en mesurant les variations latérales et horizontales de la résistivité le long d'un axe rectiligne de mesure. L'équipement est composé d'un ensemble d'électrodes reliées par un câble associé à un système de multiplexage et à un résistivimètre. Les électrodes sont disposées suivant un profil horizontal en respectant un écartement constant ; le système de multiplexage interroge séquentiellement une série de quadripôles dont la géométrie est définie préalablement à l'exécution des mesures (A et B injectent le courant et M et N mesurent la différence de potentiel) (fig. 29).

La localisation de l'ensemble des prospections électriques effectuées depuis 2001 sur l'agglomération d'*Epomanduodurum* est présentée sur la figure 30. Au total, ce sont 55 ha qui ont été prospectés sur les communes de Mandeure et Mathay. La majeure partie des prospections a concerné la reconnaissance de l'extension de l'agglomération antique qui se développe principalement dans le fond de vallée, aussi bien en rive gauche qu'en rive droite du Doubs, mais également sur le plateau, qui surplombe le théâtre.

Près de 100 sondages électriques ont aussi été effectués en 1999 en rive gauche, préalablement à l'implantation du tracé de la déviation routière du Shunt de Mathay (Dabas & Aubry, 1997).

Traitement des données et limites de la méthode

Les données électriques issues des acquisitions faites avec le dispositif ARP ne nécessitent pas de traitement particulier, à l'exception de l'élimination des points aberrants de mesure et une réinterpollation en mailles carrées. Néanmoins, dans la mesure où les résistivités apparentes mesurées correspondent à des volumes de sol hétérogènes il est nécessaire, comme dans le cas de la tomographie électrique, d'utiliser des logiciels d'inversion, tel que *Res2Dinv* pour modéliser les corps présents dans le sous-sol (Loke & Barker, 1996). L'interpolation est basée sur une méthode d'optimisation par les moindres carrés (RMS). Les inversions consistent à chercher un modèle de terrain qui aurait la

réponse la plus proche de celle mesurée in situ en minimisant après plusieurs itérations l'écart entre les résultats de la prospection réelle et ceux de la prospection simulée. Des investigations de ce type ont été conduites au sud du théâtre antique de Mandeure, dans la prairie des « Ouchottes » afin de reconnaitre les incisions d'anciens chenaux dans la stratigraphie de ce secteur de la plaine alluviale.

La méthode électrique subit peu de perturbations en dehors des variations climatologiques qui affectent l'humidité du sol : une dessiccation de la couche superficielle par exemple freine la pénétration et la circulation du courant dans le sol, entraînant une augmentation des valeurs de résistivités. On peut cependant s'en affranchir par des corrections appropriées. Comme toutes les méthodes géophysiques, elle est sensible également aux irrégularités topographiques de la surface du sol. Une anomalie en creux a tendance à augmenter artificiellement la résistivité apparente car la tension à la surface augmente. A l'inverse, une anomalie en élévation diminue la résistivité apparente du sol.

2.2.1.1.2 Les méthodes magnétiques

Historique

Le fait que les poteries acquièrent une forte susceptibilité* magnétique est connu depuis la fin du XIXème siècle (Folgheraiter, 1899). Cette découverte permet, pendant l'entre deux guerres, l'étude des variations de l'orientation du champ magnétique (Tellier, 1938). Dans les années cinquante, Eugène Le Borgne constata expérimentalement une augmentation de la susceptibilité magnétique des sols lorsqu' il soumettait ces derniers au feu (Le Borgne, 1955, 1960). Les prospections magnétiques sont utilisées en archéologie depuis les années cinquante (Aitken *et al.*, 1958).

Principe et équipement

Les prospections magnétiques mesurent un ensemble de phénomènes dépendant du champ magnétique terrestre (CMT). Cette méthode est dite *sans contrôle de source* puisqu'elle utilise le champ magnétique existant à l'état naturel. Ce champ possède trois origines. Une origine interne, assimilable à un champ dipolaire aussi appelé champ de Gauss, avec actuellement une orientation décalée de 11,5° par rapport à l'axe de rotation de la Terre, une origine externe, conséquence des courants électriques parcourant la haute atmosphère et des tempêtes magnétiques provoquées par les particules émises par le soleil. Enfin, ce qui va nous intéresser dans le cadre des prospections magnétiques appliquées à l'archéologie, les perturbations dues à la présence d'anomalies géologiques ou anthropiques. L'intensité de ces anomalies est de l'ordre de quelques dizaines de nanotesla (nT) alors que le champ magnétique terrestre est de l'ordre de 46700 nT aux latitudes de la France. Le Tesla est une unité d'induction magnétique qui, traversant une surface de 1 m², génère une force électromotrice de 1 volt. Il est défini par la formule : $1T=V*s/m^2$ avec V en volts, s en secondes.

Pour comprendre comment s'effectuent les modifications de la valeur du CMT en liaison avec des perturbations d'origine anthropique ou naturelle, il convient de détailler les différents types d'aimantation auxquels les matériaux sont soumis.

Les différents types d'aimantation

Il existe deux principaux types d'aimantation : l'aimantation induite et l'aimantation rémanente*.

L'aimantation induite est directement dépendante de la susceptibilité magnétique, qui caractérise la capacité d'un matériau à s'aimanter sous l'effet d'un champ magnétique et du champ inducteur H (dans notre cas le champ terrestre) : $\overrightarrow{J}=K*\overrightarrow{H}$ où J est le champ induit et K la susceptibilité magnétique. Cette susceptibilité représente la facilité d'un corps à s'aimanter.

L'aimantation rémanente correspond à une orientation des dipôles suivant le champ magnétique local appliqué au moment de la formation (aimantation rémanente détritique) ou de la chauffe (aimantation thermorémanente) des matériaux. L'aimantation thermorémanente s'acquiert lorsque les minéraux franchissent leur point de Curie, c'est-à-dire la température à laquelle ils perdent toute aimantation spontanée.

On peut considérer que le sous-sol est composé d'un ensemble de matériaux qui s'apparentent à des dipôles aux propriétés magnétiques différentes.

Dans le cas de valeur de susceptibilité magnétique $K<0$, il s'agit de diamagnétisme : l'intensité de l'aimantation induite est alors dans le sens opposé au champ inducteur. Tous les corps présentent un phénomène de diamagnétisme ayant pour origine la déformation des orbites électroniques des atomes sous l'action d'un champ extérieur. C'est un phénomène faible et réversible (lorsque le champ extérieur disparaît, l'aimantation disparaît). Il est par exemple observable dans l'eau, les quartz, les feldspaths et les sels.

Dans le cas de valeur de susceptibilité magnétique $K>0$, il s'agit de paramagnétisme : ce phénomène est, tout comme le diamagnétisme, faible et réversible mais, dans ce cas, le champ induit tend à renforcer l'action du champ inducteur. Les métaux, les gneiss, la dolomie, les pyroxènes, les olivines et la biotite font par exemple partie des substances paramagnétiques.

Dans le cas de substances ferromagnétiques, les moments magnétiques de chaque atome s'alignent spontanément dans des régions appelées domaines et cela même en l'absence de champ magnétique externe. En général, le moment magnétique total est nul parce que les différents domaines ont des orientations différentes et leurs effets s'annulent. Si les moments magnétiques d'une substance sont antiparallèles (même orientation mais direction différente) dans les domaines et de grandeurs différentes, le moment magnétique total est différent de zéro. La substance est alors appelée ferrimagnétique. C'est le cas par exemple de la magnétite, la maghémite et l'ilménite (fig. 31).

L'origine des anomalies

Ces paramètres magnétiques ont une influence locale sensible sur le CMT. Ces variations du champ peuvent avoir plusieurs origines anthropiques ou naturelles. Elles peuvent provenir de structures ou de matériaux chauffés ou ferreux dont la réponse très forte implique des phénomènes de thermorémanence ou de ferromagnétisme, ce qui est par exemple le cas pour les fours ou par exemple les ferrailles erratiques modernes. Dès 1955, Le Borgne s'est intéressé à la susceptibilité magnétique des sols, en

constatant que cette dernière était étrangement plus forte dans les cinq premiers centimètres de sols que dans la roche mère (sauf quand la roche mère est très magnétique comme dans le cas les basaltes par exemple). Il a réalisé une série d'expériences montrant que les fortes valeurs de susceptibilité des premiers centimètres des sols étaient principalement dues à l'élévation de température provoquée par des feux réitérés sur ces sols (Le Borgne, 1955). L'augmentation de la susceptibilité magnétique dans les sols peut être aussi provoqué par l'action des micro-organismes (Fassbinder *et al.*, 1990).

En prenant en compte tous les effets induits par l'aimantation, il est possible de distinguer, grâce à cette méthode, les structures enfouies, construites ou creusées dans le substrat. En revanche, à la différence de la prospection électrique, les anomalies magnétiques sont beaucoup plus délicates à interpréter : l'intensité du signal ne dépend pas uniquement de la dimension d'une structure. Cette dernière apporte sa contribution au signal magnétique au même titre que la nature minéralogique et la position de la structure. Pour accéder aux dimensions, à la forme et à la profondeur de la structure enfouie il est nécessaire de modéliser la réponse en effectuant une inversion, c'est-à-dire créer un modèle dont la réponse magnétique est similaire à celle enregistrée sur le terrain.

Mise en œuvre

Les prospections magnétiques ont été réalisées avec un gradiomètre fluxgate Ferex CON 60 de la société Foerster, un gradiomètre Fluxgate Grad 601-2 de la société Bartington et aussi parfois avec un magnétomètre à pompage optique G858 de la société Geometrics équipé de deux capteurs. Ces appareillages offrent une sensibilité de l'ordre du dixième de nanotesla (nT) pour le G858 et 0,3 nT/m pour le Grad 601. Dans le cas du G858, l'utilisation simultanée de deux capteurs superposés permet de calculer la différence entre les deux signaux, usuellement nommé « pseudogradient ». Le dispositif permet de s›affranchir des variations temporelles du champ magnétique terrestre. Le Gradiomètre 601-2 de Bartington ne donne en sortie que le pseudogradient.

Sur les communes de Mandeure et Mathay, environ 50 ha ont été prospectés avec la méthode magnétique, en mesurant selon les cas de 2 à 10 valeurs par mètre le long de profils espacés de 50 cm ou 1 m. Contrairement à la prospection électrique, les acquisitions se sont déroulées sur une fenêtre beaucoup plus large (fig. 32). La majeure partie des acquisitions faites durant la période 2001-2007 étaient localisées dans la ville antique ou à ses abords immédiats. Depuis 2008, nous avons élargi notre secteur d'intervention à l'échelle de la fenêtre LiDAR (81 km²) afin d'intégrer plus globalement le territoire de la ville antique.

Traitement des données et limites de la méthode

Les données brutes de prospection magnétique nécessitent de nombreux traitements afin d'être plus aisément interprétables. Elles sont d'abord reéchantillonnées le long de chaque profil à partir du pas initial de mesure puis réinterpolées en maille carrée entre les profils grâce à un algorithme de krigeage*. Les valeurs aberrantes sont éliminées à partir d'un filtrage par la médiane de dimension 7 x 7 pixels avec un seuil de filtre égal à + ou - 10 nt/m par rapport à la médiane : si la médiane d'un pixel et des 8 pixels adjacents est supérieure ou inférieure de 10 nT par rapport à la valeur du pixel,

ce dernier est remplacé par la médiane. Les différences entre profils, dues à l'orientation des capteurs ainsi qu'à leur bruit de fond, sont éliminées à partir d'un délignage par une constante, souvent entre +10 et -10 nT/m. Cette fonction calcule la moyenne le long de chaque profil, en ne prenant que les valeurs comprises entre les limites -10 et +10 nT et égalise les différentes moyennes par soustraction ou addition. Enfin, une fonction de défestonnage permet de limiter l'effet de distorsion apparu dans la forme des anomalies et induit par des lignes de marche effectuées alternativement en sens aller-retour. Tous ces traitements sont effectués grâce au logiciel *WUMAP* (Tabbagh, 2000). La figure 33 montre un exemple de l'application successive de ces traitements aux données magnétiques.

Le principal inconvénient de la méthode est sa sensibilité à de nombreuses causes de perturbations statiques (ferrailles erratiques, clôtures métalliques, pylônes de lignes électriques) ou variables (environnements urbains ou industriels, …). Ces corps risquent de perturber le CMT de quelques dizaines à quelques centaines de nT et sur plusieurs mètres de rayon, ce qui rend impossible à l'endroit concerné l'observation des structures présentes dans le sous-sol.

2.2.1.1.3 Les méthodes électromagnétiques, la méthode Slingram

Historique

Les premières applications archéologiques datent de la fin de la seconde guerre mondiale avec l'utilisation des détecteurs de mines. Les résultats ne furent pas très probants. Les recherches sur cette méthode de prospection prirent un nouvel essor dans les années 60 (Scollar, 1962) avec pour finalité de s'affranchir de l'inconvénient majeur de la méthode électrique qui nécessite, pour avoir un bon contact, de planter des électrodes dans le sol. Les résultats étaient très complexes à traiter et les premiers appareils observaient un signal provenant des propriétés magnétiques du sol plutôt que de la conductivité* électrique. En 1970, Tite et Mullins proposent que la conductivité électrique des matériaux influe non pas sur l'intensité du signal mais sur son déphasage (mesure de la quadrature du signal) (Tite & Mullins, 1970).

Principe et équipement

La méthode de prospection électromagnétique dite «Slingram » est une méthode « active » et émet un champ magnétique par le biais d'une bobine. Celui-ci induit des « courants de Foucault » générant eux-mêmes dans les matériaux du sous-sol un champ magnétique secondaire qui est d'autant plus important que les matériaux sont bons conducteurs. La bobine réceptrice reçoit le signal du champ électromagnétique primaire couplé au champ magnétique secondaire. Ce dernier est légèrement déphasé (décalé) et c'est ce déphasage qui est mesuré pour obtenir la valeur de la conductivité électrique, mesurée en milli siemens par mètre (mS/m).

La conductivité dépend essentiellement de la qualité et de la quantité de l'eau dans les sols et de certaines caractéristiques du milieu (porosité, granulométrie, salinité de l'eau) (McNeill, 1980a). La présence d'argile ou de minéraux conducteurs comme la magnétite ont aussi un impact sur cette mesure, de même que la température de l'eau au moment de la mesure.

Les valeurs moyennes de conductivité rencontrées habituellement pour différents types de matériaux sont présentées figure 27. En milieu alluvial par exemple, on constate que ces valeurs discriminent parfaitement la structuration du sous-sol en différenciant dôme de graves, remplissages limoneux, et blocs calcaires…. Toutefois, les variations de conductivité peuvent énormément varier pour un même faciès sédimentaire. Elles sont à mettre en relation avec la porosité, la teneur en eau et l'argilosité des matériaux. De plus, des matériaux différents ont parfois la même conductivité, comme par exemple certains sables et graviers. Il est nécessaire, pour différencier ces formations lors de l'interprétation, de posséder des données complémentaires, fournies par des forages mécaniques, sur la nature des couches, leur épaisseur et la profondeur du toit de la nappe.

La profondeur d'investigation est variable suivant l'orientation des bobines. Si les bobines sont orientées horizontalement, le dipôle est alors vertical et la profondeur d'investigation est égale, en théorie, à 1,5 fois l'écart entre les bobines (McNeill, 1980b). A l'inverse, en utilisant un dipôle horizontal la profondeur d'investigation est réduite de moitié. Enfin, la valeur de conductivité correspond à une conductivité apparente et non à une conductivité vraie. L'investigation porte en réalité sur une succession de formations différentes. Ainsi, la mesure donne une conductivité globale, qui intègre les différentes conductivités réelles de l'ensemble investigué. De plus, toutes les profondeurs n'influent pas de la même manière sur la mesure ; ainsi l'appareil est plus sensible aux terrains situés près de la surface. C'est pour cela que l'on considère que la profondeur d'investigation en mode dipôle vertical est égale à l'écart entre les bobines d'émission et de réception.

Mise en œuvre

Nous avons utilisé l'équipement EM31-MK2, de la société Geonics. Cet appareil dit « Slingram » est constitué de deux bobines, l'une émettrice et l'autre réceptrice. La fréquence du champ émis est égale à 9,8 KHz et les bobines sont espacées de 3,66 m. Le volume du sol intégré par la mesure est considéré comme équivalent à une demi-sphère de 3,5 m de rayon dans le cas d'une utilisation de l'équipement en mode dipôle vertical. L'appareil est relié à un GPS* par un système « Allegro » autorisant en temps réel l'affectation d'une position géographique à chaque valeur de conductivité mesurée (fig. 34).

Grâce au couplage GPS/EM31, on peut marcher librement sans implanter de profils. Il est possible de visualiser en temps réel ses déplacements et de prospecter ainsi suivant une maille assez régulière. L'appareil enregistre une mesure toute les deux secondes, ce qui équivaut pour un opérateur marchant à 3 km/h à un point de mesure tous les 1,7 m. Les profils sont espacés de 3 à 5 m. L'idéal pour effectuer des profils régulièrement espacés est de suivre lorsqu'il y en a les traces laissées au sol par les engins agricoles.

Aujourd'hui, 131 ha ont été prospectés dans le fond de vallée avec cet appareillage. Centrées sur l'agglomération antique entre 2001 et 2007, les prospections se sont étendues à partir de 2008 dans la plaine amont au nord de Pont-de-Roide, où la quasi-totalité des zones accessibles de ce secteur a été couverte (fig. 35).

Traitement des données et limites de la méthode

Le traitement des données se limite à une réinterpolation par krigeage suivant une maille carrée de 3 m x 3 m ou 5 m x 5 m et à une élimination des points aberrants de mesure.

Les images en sortie permettent une lecture et une cartographie très rapide du contour des formations géologiques. Il faut toutefois garder à l'esprit que les matériaux métalliques et le manque d'humidité du sol peuvent fortement perturber les données.

2.2.1.1.4 La méthode Radar sol

Historique

Les premiers RADAR (Radio Detection and Ranging) furent développés durant la seconde guerre mondiale pour la surveillance de l'espace aérien. Les premières applications à l'exploration du sol, appelé GPR (Ground Penetrating Radar) ou radar sol, datent des années 70 (Conyers & Goodman, 1997). Elles visaient dans une optique totalement militaire à détecter les mines ou les tunnels. Cette méthode de prospection est maintenant très utilisée aussi bien dans le domaine de l'hydrogéologie que du génie civil ou de l'archéologie.

Principe et équipement

Le GPR impulsionnel est composé de deux antennes, l'une émettrice et l'autre réceptrice. Les fréquences d'utilisation, de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de MHz, sont beaucoup plus élevées que les fréquences utilisées par des appareils de prospection électromagnétique comme l'EM 31. L'emploi de ces très hautes fréquences a aussi pour but de limiter les effets latéraux (Scollar *et al.*, 1990). Les contrastes de conductivité, de permittivité diélectrique et de perméabilité magnétique entre les différents corps présents dans le sous-sol entraînent une réflexion d'une partie du signal émis. Ces réflexions sont enregistrées par la bobine réceptrice ce qui permet de mesurer les différents temps de trajet aller-retour de l'onde électromagnétique entre la surface du sol et les surfaces de réflexion. L'intensité des réflexions est d'autant plus grande que le contraste de permittivité électrique est important.

Matériaux	Vitesse (m/ns)	Atténuation (dB/m)
Air	0.3	0
glace	0.16-0.17	0.01
sol sec	0.15	
sable sec	0.15	0.01
sol humide	0.06	
Granite	0.13	0.01-1
sel sec	0.13	0.01-1
roche sèche	0.12	
roche humide	0.1	0.4-1
calcaire	0.12	
chaussée	0.1	
schistes	0.09	1-100
silts	0.07	1-100
argile	0.06	1-300
eau douce	0.033	0.1
eau de mer	0.033	1000

Fréquence d'émission (MHz)	Profondeur d'investigation moyenne (m)	Pouvoir de résolution moyen (cm)
450	1	10
200	2.5	25
100	5	50

Figure 36. Vitesse de propagation et atténuation des ondes radar pour différents matériaux. Profondeur d'investigation et pouvoir de résolution en fonction de la fréquence d'émission (d'après Sensor and Software, 2002 ; Camerlynck, 2005)

Dans le sol, la vitesse de propagation des ondes est liée à la permittivité électrique ε selon la formule : $v = c/\varepsilon$ où c est égal à la vitesse de la lumière dans le vide. Cette permittivité électrique est, aux fréquences avec lesquelles nous travaillons, principalement fonction de

la tentative d'alignement des molécules dipolaires avec un champ électromagnétique (Guegen et Palciauskas, 1992).

La figure 36 présente les vitesses moyennes de propagation des ondes dans différents types de matériaux ainsi que l'atténuation respective du signal. L'atténuation du signal est maximale dans les matériaux argileux pour lesquels les vitesses de propagation des ondes sont aussi les plus faibles. L'augmentation de la fréquence du signal diminue alors le pouvoir de pénétration de l'onde mais, a contrario, augmente le pouvoir de résolution moyen (fig. 36b). La difficulté de ce type de prospection résidera donc dans le choix d'une fréquence d'émission « optimale » qui soit à la fois capable de détecter les structures archéologiques de petites dimensions et de pénétrer le sous-sol jusqu'à une profondeur d'investigation suffisante.

Mise en œuvre

Pour cartographier les surfaces à prospecter, on effectue des profils en gardant les deux antennes à distance fixe l'une de l'autre. A chaque point de mesure choisi, on émet un signal qui se propage dans le sol. La succession des différents échos dus à un changement de la permittivité sont enregistrés par l'antenne de réception sous forme de traces. Les traces le long du profil sont assemblées pour générer une coupe temps. Il faut ensuite estimer la vitesse de propagation des ondes dans les différents milieux traversés pour passer d'une coupe temps à une coupe profondeur. Cette coupe présente la stratification des différentes structures ayant successivement réfléchi le signal émis et l'on pourra par la suite ajouter plusieurs coupes parallèles pour former un « cube de données » afin d'obtenir soit un modèle en trois dimensions de l'ensemble des structures réflectives repérées ou en le coupant horizontalement pour représenter les structures présentes à une profondeur ou un temps donné.

A Mandeure, une prospection radar sol de 0,5 ha a été réalisée, dans la prairie « des Ouchottes » (fig. 37) dans le but de préciser le plan des vestiges enfouis au sud du théâtre antique et reconnus par les autres méthodes. Les profils ont été espacés de 40 cm et une mesure tous les 25 cm a été prise le long de ces derniers.

Nous avons aussi effectué à titre expérimental différentes prospections sur plusieurs zones humides caractéristiques de Lorraine, dénommées « mardelles » en milieu souvent boisé, afin de tester l'apport de cette méthode à la reconnaissance de la stratification de ces milieux de dépôts (fig. 38). Dans les deux cas, le radar utilisé était un radar pulse Ekko 100, configuré avec deux antennes distantes de 50 cm et une fréquence d'émission égale à 225 MHz.

Traitement des données et limites de la méthode

Il est nécessaire de choisir la fréquence d'émission et donc le rapport profondeur d'investigation sur résolution en fonction des thématiques de recherches choisies en n'oubliant pas que la profondeur d'investigation se trouve très limitée dans certains milieux, notamment argileux et humides (fig. 36).

Il faut traiter la donnée brute en plusieurs étapes à l'aide du logiciel EkkoMapper. Le premier traitement (Dewow) consiste à corriger la saturation du signal en supprimant le signal basse fréquence qui se

superpose aux réflecteurs hautes fréquences. Puis la composante négative des traces d'origine est convertie en composante positive et le logiciel calcule une enveloppe moyenne (Average Envelopped Amplitude). Le bruit est ensuite filtré par un passe-bas sur une maille 3 x 3 (Noise filter). Puis les réflecteurs profonds sont accentués par l'application sur chaque trace d'une moyenne mobile calculée sur une fenêtre de 3 traces (Background substraction). L'étape suivante consiste à effectuer un filtrage par moyenne mobile sur 2 traces le long de chaque profil (trace to trace averaging) puis les profils temporels sont convertis en profondeur par estimation de la vitesse des ondes dans le sédiment (fig. 36) (Velocity). Enfin, la topographie est incluse pour corriger les données radar.

2.2.1.2 Les sondages et les fouilles

En complément des informations planimétriques fournies par les différentes méthodes de prospection, nous avons utilisé des informations sur la stratigraphie des couches du sous-sol. Dans le cas des remplissages sédimentaires, nous avons pu reconnaître leur nature à partir de séquences prélevées manuellement à l'aide d'un carottier russe. Ce dernier permet d'extraire sans compaction des carottes de sédiment de 5 à 8 cm de large et de 50 cm ou 100 cm de longueur jusqu'à une profondeur de plusieurs mètres. Ces prélèvements fournissent ultérieurement la matière sédimentaire nécessaire aux différentes analyses (minéralogiques, granulométriques, palynologiques, datation radiométriques) visant à caractériser et à dater les différentes couches du remplissage.

Les études palynologiques réalisées en milieu anaérobie, le plus propice à la conservation du pollen, apportent, lorsque la conservation des pollens est satisfaisante, des informations de premier ordre sur l'évolution de la couverture végétale. Après les tentatives infructueuses faites dans les bras morts du Doubs, nous avons choisi de nous intéresser à l'analyse du contenu sporo-pollinique des remplissages sédimentaires accumulés dans le fond des petites vallées qui entaillent les plateaux calcaires. Ces fonds de thalweg sont en effet parcourus par des écoulements plus ou moins temporaires qui ont abouti au fil du temps à la création de zones humides marécageuses.

Pour l'étude des dynamiques hydrologiques holocènes de la vallée du Doubs (datation et durée de fonctionnement des paléochenaux) , nous avons utilisé les données de différents sondages ou tranchées géo-archéologiques réalisées antérieurement dans le cadre du PCR, notamment celles des tranchées implantées face au théâtre antique (80 m x 2 m et 75 m x 1 m) perpendiculairement à l'axe de la vallée.

Concernant les structures archéologiques proprement dites (datation, fonction, état de conservation, contexte stratigraphique), nous avons exploité les données issues des sondages du PCR, de la surveillance des travaux du SIVAMM ou des opérations de diagnostic archéologique conduites par l'INRAP.

2.2.2 Les méthodes externes

Les méthodes externes décrites à présent, impliquent l'existence, hors du site ou à sa surface, de manifestations visuelles ou matérielles d'une présence archéologique.

2.2.2.1 Les prospections au sol

Si la géophysique fournit des informations planimétriques d'une grande finesse sur l'organisation des structures encore enfouies dans le sol, elle ne permet pas en revanche de dater précisément les structures repérées. Des informations chronologiques sur ces structures peuvent être obtenues par la collecte d'objets résiduels à la surface du sol qui leur sont associés. L'échantillonnage, puis l'étude et le tri du matériel archéologique, selon des protocoles adaptés, permettent d'aboutir à une interprétation très riche des sites (Hesse, 1985).

Méthodologie

Dans l'environnement géographique proche de l'agglomération antique de Mandeure, les espaces disponibles pour la prospection ont été divisés en surfaces de tailles sensiblement égales (de 1 à 3 ha en moyenne) (Nouvel, 2006). Les zones ainsi délimitées peuvent regrouper plusieurs parcelles cadastrales. Les prospections ont consisté en un ramassage systématique avec un passage tous les dix mètres. Tout le mobilier récolté a été conservé à l'exclusion du mobilier contemporain (postérieur à la généralisation des céramiques grésées au XVIIème siècle) et des matériaux de construction (ces derniers après enregistrement ont été jetés). Les zones de concentration de mobilier ont été délimitées par un relevé au GPS et identifiées comme un site. Parfois, une trop faible densité de mobilier ne permet pas de faire l'hypothèse d'une occupation pérenne, mais le mobilier a été tout de même récolté.

Les surfaces prospectées par cette méthode approchent à l'heure actuelle les 200 ha et ont concerné principalement les zones labourées. Les zones boisées et en prairie sont peu propices à la mise en évidence de vestiges matériels à la surface du sol.

Le second type de prospection, principalement mis en œuvre à l'échelle de la fenêtre LiDAR, a été beaucoup moins extensif que la collecte à la surface de matériel ou de mobilier. Il a consisté à observer et/ou récupérer du matériel archéologique sur les indices de sites révélés par la microtopographie grâce à la prospection LiDAR. Pour ce faire, plusieurs prospecteurs ont balayé à vue les zones considérées comme potentiellement intéressantes en utilisant des détecteurs de métaux. Les prospections étaient préparées sous formes de fiches regroupant la carte Scan 25 de la zone, un modèle ombré du terrain et les notes ou mentions anciennes (cf. annexe A).

2.2.2.2 Les prospections aériennes

2.2.2.2.1 Historique de la méthode

Il n'a pas fallu attendre l'invention de la photographie aérienne pour que des chercheurs et des érudits remarquent le lien qui pouvait exister entre des variations de la teinte du sol ou des cultures et la présence de vestiges archéologiques enfouis. Pierre Louvet, en 1631, dans son « *Histoire et antiquitez du pays de Beauvaisis* », mentionne à la page 25 : « *…neamoins paroissent encore des fondemens fort massifs, de fort grandes remarques, de grandes espaces de logis, grand nombre de puis, & caves, quantité de medailles d'argent & de cuïure* ; *& principalement quand cette grande campagne est ensemencée en bles on y reconoit encore le cõpassement & les endrois des rues ou le bled est plus*

*petit qu'*és *lieux ou les maisons* étoient bâties. ». Régionalement, on peut aussi mentionner les écrits de l'abbé Bouchey (Bouchey, 1862) qui dans le volume 1 de ses « Recherches historiques sur la ville, la principauté et la république de Mandeure » fait mention à la page 51 d'une voie où « *…on remarque pendant l'été un long ruban de blés toujours moins hauts que les autres qui touchent, parce que là il y a moins de terre végétale. Les villageois appellent ce sillon stérile le Chemin maudit ou des sarrasins* ». Mais c'est la combinaison de deux techniques nouvelles au début du XXème siècle : l'aviation et la photographie qui révolutionne l'appréhension spatiale des vestiges archéologiques (Chevallier, 1964). En 1852, des tumulus sont observés à partir d'un ballon. Le premier cliché aérien date de 1858 et est l'œuvre de Félix Nadar qui prit un cliché du Petit-Clamart. Les vestiges du port d'Ostie sont repérés en 1911 grâce à cette technique. En 1925 le révérend père jésuite Antoine Poidebard remarque qu'au soleil couchant, sous une lumière rasante, des reliefs apparaissent, trahissant la présence de vestiges archéologiques. Il les photographie et les déclare, et donne ainsi naissance à la photographie aérienne archéologique. Les prospections à grande échelle en France commencent durant les années 60, avec notamment les travaux de Roger Agache, René Goguey, Jacques Dassié et Raymond Chevallier (Chevallier, 1964 ; Agache, 1978 ; Dassié, 1978).

2.2.2.2.2 Principe

La détection de structures archéologiques par prospection aérienne est liée à quatre types d'indices. Osbert Guiy Stanhope Crawford a défini très tôt, dès les années 50, une classification des sites archéologiques repérables (Scollar *et al.*, 1990).

En premier lieu figurent les indices sciographiques ou « shadow-marks » qui correspondent à des ombres projetées par les reliefs résiduels. Ces indices sont observables dans des conditions particulières d'éclairage, principalement en lumière rasante à la condition d'avoir en surface, la trace même ténue en relief du vestige archéologique, qui, en cas de labourage par exemple, peut disparaître ou fortement s'atténuer. Les vestiges sont, années après années, érodés par les passages successifs du soc de la charrue. Sur la figure 39, on observe les restes du village de *Carwether entouré par un système parcellaire ancien.*

Les indices pédographiques, ou « soil marks », correspondent à des anomalies de couleur du sol. Ils apparaîssent après des labours dont l'action fait remonter à la surface du sol des éléments de fondation de vestiges enfouis plus profondément. La détection à partir de tels indices n'est opérante que sur sol nu comme le montre l'exemple de la figure 40, où sont décelés sur le plateau de Mandeure les vestiges d'un bâtiment à partir d'un changement prononcé de la couleur du sol.

Les indices hydrographiques, ou « damp-marks », sont des taches d'humidité correspondant à des phénomènes d'assèchements différentiels. L'humidité persiste plus longtemps à l'emplacement de fosses et de fossés creusés dans un substrat calcaire (fig. 41). Le meilleur moment pour prendre ces clichés est après de fortes pluies car le terrain est humidifié de façon homogène.

Les indices phytographiques, aussi appelés « crop-marks », correspondent à des variations de hauteur ou de couleur des végétaux (fig. 42). En règle générale les structures fossoyées auront tendance à

favoriser la maturation de la plante en accélérant sa croissance et la rendant plus vigoureuse. Le phénomène inverse est observé à l'aplomb des structures maçonnées (fig. 43).

Cette méthode de prospection permet, lorsque les conditions météorologiques sont satisfaisantes, de reconnaître un site en très peu de temps avec un appareil photo et un avion. Les résultats, souvent extraordinaires (Chevallier, 1964 ; Agache, 1978), révèlent ainsi les structures présentes dans le sous-sol avec une rare finesse. Mais il existe tout de même quelques limites à ce mode de reconnaissance.

Celui-ci ne s'adresse en effet qu'aux vestiges qui veulent bien se laisser voir directement ou indirectement. Certains des indices décelables (damp marks, crop marks) sont par nature de caractère fugace et il est nécessaire de survoler plusieurs fois la même zone, sans garantie ni certitude d'avoir réalisé au final la prospection exhaustive de toutes les structures aptes à être révélées par cette méthode. L'apparition de ces anomalies révélatrices des structures est en effet, soumise à des conditions climatiques particulières impliquant l'existence d'un stress hydrique, lié à une période plus ou moins prolongé de sécheresse. Les horaires de vol ont également leur importance, tout comme l'état du sol.

La principale limitation de la méthode tient au fait qu'elle ne détecte pas les structures sous couvert boisé, puisque le feuillage dense rend bien évidemment ce type de détection inopérante.

Un autre inconvénient majeur réside dans la difficulté à localiser précisément a posteriori les structures photographiées notamment lorsque les clichés n'intègrent pas d'éléments caractéristiques du paysage à partir desquels il est possible de se repérer. C'est pourquoi il est souvent nécessaire de doubler les prises de vues de détail par d'autres cadrant beaucoup plus largement le même secteur.

De plus, les clichés qui sont soumis aux déformations dues aux appareils photographiques ne sont pas toujours aisés à redresser. Pour effectuer un redressement, il est nécessaire de disposer de points de calage, c'est-à-dire des points connus et figurés sur une carte ou un plan : arbres, pylônes, poteaux, limites de champs, notamment, éléments parfois absents sur les clichés. Par ailleurs, l'augmentation de l'angle de prise de vue augmente fortement les déformations.

2.2.2.2.3 Les différents types de clichés photographiques

D'une manière générale, il existe trois types de clichés : les clichés verticaux, les clichés obliques et les orthophotographies. Tous trois ont été utilisés, à des degrés divers, dans ce travail.

Les clichés verticaux sont des prises de vues dont l'angle maximal d'inclinaison ne dépasse pas 3 grades (Aubry, 2003). Ils peuvent être noir et blanc, couleur ou infrarouge et sont principalement utilisés pour l'aménagement du territoire et leur échelle comprise entre 1/25000ème et 1/30000ème fait qu'ils sont peu utilisés pour des recherches archéologiques. Des clichés de 1940 et 1954 ont été étudiés dans ce travail. Ils contiennent peu de renseignements relatifs à des structures archéologiques, mais apportent des informations sur les parcellaires et sur les écoulements anciens.

Les clichés obliques, souvent utilisés par des archéologues pour enregistrer la trace des vestiges archéologiques sont plus précis. Par contre, les perspectives introduites par le caractère oblique des clichés entrainent de sérieuses déformations, ce qui impose de les redresser. Un rappel des types de

redressements effectués dans cette thèse est réalisé dans la sous-partie suivante. Sur Mandeure, les prospections aériennes ont été menées par René Goguey, Patrick Augé, Gérard Chouquer pendant la période 1975-1995, Jean-Pierre Simmonet, Pierre Nouvel et Stéphane Izri depuis 2003. Ces prospections menées depuis 40 ans ont permis d'acquérir plusieurs milliers de clichés aériens parmi lesquels un corpus représentatif d'environ 400 clichés a été sélectionné.

Enfin, les orthophotographies sont des images qui présentent la précision géométrique des cartes. L'orthophotographie se construit en utilisant un Modèle Numérique de Terrain (MNT*) et une photographie afin de transformer cette dernière en véritable plan. L'image de l'objet est projetée en tous points perpendiculairement à un plan. Ces clichés sont dans leur grande majorité fournis par l'IGN ; nous avons utilisé les orthophotographies de l'IGN qui datent de 1986 et de 2004 ainsi que celles acquises en 2009 dans le cadre du programme LIEPPEC. Ces dernières, avec une résolution de 1 point pour 25 cm, se sont révélées d'une grande aide dans la traque des vestiges archéologiques.

2.2.2.2.4 Les redressements

Les clichés aériens obliques ont été redressés numériquement grâce au logiciel ArcGis en utilisant des équations polynomiales d'ordre 3. Mais très souvent, le manque de points remarquables de calage n'a pas permis un redressement de bonne qualité. Nous avons cependant essayé de redresser le plus de clichés possibles grâce aux orthophotographies disponibles et aux structures identifiées par les prospections géophysiques.

2.2.2.3 La prospection LiDAR aéroportée

2.2.2.3.1 Historique et aperçu général

La technologie LiDAR aéroportée, aussi appelée « Airborne Laser Scanning » (ALS) permet d'acquérir un relevé altimétrique des surfaces survolées sous la forme d'un nuage dense de points qui sont géoréférencés avec une grande précision. Le principe de cette technique est simple : un rayon laser émis depuis un avion est réfléchi et renvoyé vers ce dernier lorsqu'il rencontre un obstacle ; connaissant la vitesse de l'onde laser, il est aisé de calculer la distance entre l'avion et le corps réflecteur.

Le LiDAR est devenu en quelques années une des sources majeures d'information numérique de terrain (Raber *et al.*, 2007). Il est utilisé dans différents champs d'application comme la modélisation urbaine en 3 dimensions, le suivi de glaciers, l'aménagement côtier etc., mais l'une de ses principales missions reste la génération de modèles de terrain (Hodgson *et al.*, 2005). A l'heure actuelle, l'utilisation du LiDAR pour la génération de modèles numériques de terrain est devenue une pratique courante dans la communauté des sciences du sol mais aussi dans le cadre de grands projets d'aménagement de l'espace financés par de gros groupes, tel Réseau Ferré de France (Hodgson et Bresnahan, 2004 ; Etienne, 2011).

Le LiDAR est étudié depuis les années soixante (Flood, 2001) et la première utilisation de la méthode a été de mesurer la distance terre-lune. Les recherches pour l'application de cette technique à

l'obtention de données topographiques ont commencé vers les années 80 (Krabill *et al.*, 1984 ; Bufton *et al.*, 1991) et les systèmes commerciaux ont été opérationnels au cours des années 90 (Pfeifer et Briese., 2007).

Les recherches ont dans le même temps continué, elles se sont orientées vers l'augmentation de la précision mais aussi vers de nouveaux principes d'acquisition. On peut par exemple citer le Lidar (full-waveform) qui, plutôt que d'enregistrer une ou plusieurs impulsions de retours discrètes, enregistre tout le signal rétrodiffusé, ce qui permet de classer les objets (sol, végétation, route etc.) rencontrés suivant la forme du signal rétrodiffusé (Chauve *et al.*, 2009 ; Wagner *et al.*, 2006 ; Pfeifer et Briese, 2007 ; Doneus *et al.*, 2008). Certains LiDAR, appelés « Shoals LiDAR », peuvent traverser l'eau et ainsi nous fournir des indications bathymétriques (Guenther *et al.*, 1996)

L'avantage principal de la méthode LiDAR par rapport à la photogrammétrie est sa capacité à percer la couverture végétale. En 1998, Kraus et Pfeifer ont démontré que les modèles d'élévation numériques avaient la même précision sous couvert végétal que ceux obtenus en champs ouverts par la photogrammétrie (Kraus et Pfeifer, 1998).

Par contre, ces données LiDAR brutes réfléchies représentent une masse considérable (plusieurs dizaines de Go de fichiers de type texte pour une centaine de km² de prospection) et comportent des points qui ne correspondent pas seulement à la surface du sol, mais également aux éléments fixes du paysage comme les bâtiments, les lignes à haute tension, la végétation voire même à des éléments mobiles comme les oiseaux « interceptés » lors du vol de l'avion (Stocker *et al.*, 2006).

Principe et équipement

Le système LiDAR aéroporté est composé de trois instruments principaux : le laser, un GPS et une unité de mesure du contrôle inertiel (IMU) mesurant l'attitude (assiette) de l'avion (roulis, lacet, tangage) (Reutebuch *et al.*, 2005). L'unité de mesure laser est constituée d'un générateur d'impulsion laser ayant une longueur d'onde comprise entre 1 et 1,5 micron (dans le proche infrarouge dans notre cas (donnée *Riegl*) et un récepteur d'ondes réfléchies par les cibles (Wehr et Lohr, 1999 ; Pfeifer et Briese, 2007). Ces ondes sont émises à une fréquence comprise entre 100 et 200 KHz (150 Khz pour notre prospection (Aerodata, 2009). Une même impulsion laser émise par le scanner est réfléchie par différents objets qui se trouvent sur son chemin. Le premier écho décrit, sous forme de points, la surface des objets ou de la végétation, tandis que le dernier écho enregistre généralement les points au sol.

L'onde n'est pas totalement bloquée par tous les corps qu'elle rencontre. La distance entre le laser et le corps réflecteur peut alors être aisément calculée en mesurant le temps d'aller-retour de l'onde. Le boîtier d'émission laser est par ailleurs muni d'un miroir rotatif ce qui permet de balayer la zone sous l'avion (avec un angle de 60° dans notre cas). La largeur de la bande du sol explorée par le miroir est déterminée par l'altitude de l'avion.

Les systèmes LiDAR récents ont une précision de 2 à 3 cm (données Riegl ; Lemmens, 2007), si l'on ajoute les erreurs dues au positionnement GPS et au système IMU, on se trouve dans une fourchette

d'erreur absolue de l'ordre de 15 cm en XY et 5 cm en Z (Ackermann, 1999). Mais la précision relative est bien meilleure.

Pour la prospection des fenêtres de Besançon (140 km^2) et Mandeure (81 km^2) l'appareil enregistrait jusqu'à 4 points de retour par émission laser. Nous avons voulu comparer sur une zone test les altitudes obtenues à partir de la prospection LiDAR aux données micro-topographiques qui avaient été récoltées dans le cadre du PCR entre 2001 et 2008 dans la boucle du Doubs (fig. 44, Bossuet et al, 2001-2005; Bossuet & Thivet, 2006, 2007, Thivet 2008). Un ensemble de 2245 points de nivellement relevés à partir d'un tachéomètre sur des maillages de différentes tailles (20 x 20m, 10 x10 m) a été utilisé. Les résultats de cette comparaison sont présentés sur la figure 45. Nous avons effectué une soustraction des altitudes enregistrées par tachéomètre aux altitudes obtenues en isolant chaque point du MNT correspondant au point mesuré sur le terrain.

La comparaison montre une différence moyenne entre les valeurs obtenues par la prospection LiDAR et le tachéomètre de 2 mm ce qui, à cette échelle peut s'apparenter à une différence nulle (fig. 45). Mais, avec 50 % des valeurs comprises entre -5 et +5 cm. Cet écart est supérieur à ce qui était attendu après lecture de la bibliographie et pourrait s'expliquer par les erreurs de mesure avec le tachéomètre.

Les vols pour l'acquisition des données LiDAR se sont étalés sur cinq missions effectuées les 9 et 10 avril 2009. Initialement, une première tentative avait été faite les 11 et 12 Mars 2009, mais elle a du être abandonnée en raison de soucis techniques rencontrés au moment de l'extraction des données . L'acquisition des mesures a été réalisée avec le scanner LMS-Q560 développé par la société allemande RIEGL. Le système a d'abord été étalonné le 8 Avril au soir sur le secteur de Besançon par la couverture d'une zone test.

Tous les paramètres de l'acquisition sont regroupés dans le tableau de la figure 46 :

Paramètres	Valeurs
Fréquence d'impulsion (KHz)	150
Vitesse de vol (nœuds)	90
angle de scannage (°)	60
Hauteur de vol (m)	entre 500 et 750
Distance interbande (m)	242
Recouvrement latéral (%)	70 (3 recouvrements)
Nombre d'échos enregistrés par impulsion émises	4
Empreinte au sol (diamètre en m)	0.35
Densité (pt/m²)	entre 8.1 et 11.1

Figure 46. Paramètres de la mission LiDAR effectuée par la Sté Aerodata les 9 et 10 avril 2009 (C. Laplaige, 2011 ; source : Aerodata, 2009)

2.2.2.3.2 Du nuage de point au modèle numérique de terrain

Le nuage de points regroupe indifféremment les points provenant du sol, de la végétation, du bâti etc.. Il est donc nécessaire de filtrer l'ensemble de ces points afin de ne conserver, en fonction des problématiques de recherche (urbanisme, environnement, végétation, archéologie, etc.) que ceux qui nous intéressent. Dans notre cas, ce sont les points correspondant au sol qui nous intéressent et qui

permettent de créer un Modèle Numérique de Terrain (MNT) qui est une représentation de la surface expurgée des constructions, de la végétation et de la faune (oiseau, bovins...).

La classification

Il est possible d'utiliser des algorithmes afin de « classifier » les points en grands groupes, par exemple, les bâtiments, la végétation haute, les buissons et le sol. Sur la figure 47a, les points sont représentés suivant leur altitude. On voit les maisons, les haies et les arbre. La figure 47b montre les mêmes points après classification : les points rouges correspondent au bâti, les verts à la végétation et les oranges au sol. Enfin la figure 47c correspond aux points définis comme étant le sol.

Le développement de méthode de filtrage des données est toujours une thématique dynamique de recherche (Axelsson, 1999; Vosselman, 2000 ; Sithole & Vosselman, 2004 ; Silvan-Cardenas & Wang, 2006 ; Opitz, 2008).

Dans le cadre du projet Lieppec, deux types de classifications ont été effectuées grâce au logiciel *Terrascan*, l'une par la société Aerodata et l'autre par nos soins. L'algorithme utilisé pour la classification effectuée par Aerodata n'appartenant pas au domaine public, nous nous contenterons de décrire la méthode de classification mise en place par nos soins. Elle est simple et rapide à mettre en oeuvre.

Pour générer les points correspondant au sol, nous avons commencé par définir la classe (catégorie, par exemple : sol, végétation basse, végétation haute, etc.) de tous les points comme étant *par défaut*, c'est-à-dire sans classe, puis nous avons isolé et conservé uniquement les points correspondants aux derniers échos afin de supprimer dans le set de données les points réfléchis par la surface de la végétation. Ces derniers ont été classés comme « végétation ».

Ensuite, on supprime des points en limitant la taille des bâtiments à 40 m, c'est-à-dire en enlevant tous les points dont l'altitude est supérieure de 40 m par rapport aux points les plus bas. Cette manipulation permet de supprimer les points aberrants en hauteur causés par exemple par les oiseaux.

Nous avons fixé l'angle maximal trouvé sur le terrain à 88°, c'est-à-dire qu'aucun angle entre les points ne peut excéder cette valeur. Ceci permet d'éliminer les bâtiments qui sont, la plupart du temps, construit à la verticale (90°), mais aussi les troncs d'arbre (Sithole, 2001).

Avec ces paramètres, le logiciel génère un modèle initial sous forme de triangles à partir des points les plus bas puis ajoute tous les points correspondant aux derniers échos en allant vers le haut. On inclut à ce moment au calcul du modèle un angle maximal d'itération, dans notre cas 6° (fig. 48) et une distance maximale d'itération (dans notre cas 2,4 m).

L'angle d'itération est l'angle maximal existant entre le point, sa projection sur le plan et le sommet de triangle le plus proche. Si cet angle est supérieur à l'angle maximal, le point est éliminé. La distance maximale d'itération est la longueur maximale de la projection. Ce paramètre nous assure que l'itération n'effectue pas de grands changements lorsque les points sont très espacés

Le niveau du sol augmente alors au fur et à mesure jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de points intégrables au modèle (Crosilla *et al.*, 2004). Il ne reste plus qu'à supprimer les points qui se retrouvent sous la nouvelle surface en sélectionnant, pour chaque point, les 25 autres points les plus proches, puis en faisant passer une droite à travers. Les points situés à 10 cm sous cette droite sont éliminés. L'écriture du programme correspondant à ce processus de filtrage est présentée en annexe (C).

La génération du modèle numérique de terrain: effet de la densité du semis de point sur la qualité du modèle numérique de terrain

Nous sommes maintenant en présence des points correspondant uniquement au sol, il ne reste plus qu'à générer une grille de pixels avec une altitude par pixel. Mais auparavant, il est important de réfléchir à la densité de points au sol car la taille des structures peut varier d'1m² à plusieurs dizaines de m². Cette densité de points et ses variations, en plus de la précision de la mesure (cf. *supra*) conditionnent la détection des structures.

Quels sont les facteurs susceptibles de faire varier la densité de points relevés ? la première explication est que la scène LiDAR résulte au final de l'assemblage de plusieurs bandes parallèles de prospection, censées se recouvrir latéralement. La figure 49 montre bien l'effet induit lorsque le recouvrement est insuffisant avec des zones indexées (1), légèrement plus claires que les zones (2) et qui correspondent à des zones où seuls deux recouvrements latéraux ont été possibles au lieu de trois. Dans ces conditions, la différence du nombre d'impacts au sol demeure tout de même minime (de l'ordre de 1 à 2 impacts par m²).

La densité de points correspondant au sol varie aussi en fonction d'un autre facteur qui est la nature de l'occupation du sol. S'il est évident que la densité est moins importante en zone urbaine car bon nombre de points correspondent au bâti, il est par contre intéressant de regarder l'effet de la couverture boisée sur la densité de points au sol. La figure 49 montre qu'il n'y a que très peu de différence entre le couvert boisé de feuillus et le sol nu. Par contre, les plantations de conifères, notés (3), font fortement baisser la densité de points correspondant au sol en rendant ces zones complètement imperméables à la mesure.

La figure 50 présente la répartition des densités de points au sol par m². Si la résolution moyenne est de 7,39 points/m² pour une superficie de 81 km², il est important de garder à l'esprit que cette résolution est hétérogène à l'échelle de la fenêtre. Il existe dans son emprise de véritables zones de « blanc », mal documentées où l'information est, sinon inexistante, tout du moins de piètre qualité car constituée par une densité de points bien inférieure à cette valeur moyenne.

La création du MNT, interpolation et choix du mode de représentation

Plusieurs modèles d'élévation numériques ont été développés ces dernières années pour représenter la surface du sol : le TIN (Triangular Irregular Network), sorte d'assemblage de triangles modélisant la surface, les lignes de contours et, celui que nous utilisons, la grille régulière de pixels autrement appelée MNE* (Modèle Numérique d'Elévation). Son utilisation est assez facile du fait de sa structure

en pixels et il est compatible avec des outils comme *Spatial Analyst*. C'est d'ailleurs le modèle le plus utilisé actuellement (Lohr, 1998 ; Wack & Wimmer, 2002, Challis *et al.*, 2008).

Cette grille est composée d'un ensemble de pixels (ou cellules) ayant chacun une taille et une valeur d'élévation définie. L'idée de former une grille pour modéliser « fidèlement » la surface du sol peut parfois déranger l'opérateur car elle représente le terrain d'une manière discontinue, mais, avec une résolution de l'ordre de 4 pixels par m², l'approximation peut être considérée comme négligeable dans notre cas (Ramirez, 2006).

L'élévation est obtenue en interpolant les points adjacents (Burrough et McDonnel, 1998). Elle permet donc de déterminer la hauteur d'une surface en utilisant des points dont la valeur altimétrique est connue. On peut pour ce faire utiliser plusieurs méthodes de calcul, par exemple le krigeage* ou la pondération inverse à la distance (IDW)*. C'est cette dernière que nous avons utilisé pour générer nos modèles numériques de terrain. Cette méthode donne beaucoup d'importance aux points les plus proches du pixel à générer car nous utilisons la distance au carré. Cette méthode de l'IDW fonctionne bien pour une forte densité de points (Childs, 2004) et dans ce cas, la différence avec le krigeage peut être négligeable (Chaplot *et al.*, 2006).

La résolution du modèle numérique de terrain

La résolution du modèle correspond à la taille de chaque pixel, elle nous indique le niveau de précision. Cette détermination de la résolution doit être choisie en fonction des problématiques et de la taille des structures recherchées (métriques à plurimétriques) (Barber et Shortrudge, 2004 ; Ziadat, 2007). Par exemple, on aura tendance à utiliser des MNT très fins, très gourmands en ressources de calcul, pour mettre en évidence d'infimes variations du micro relief dues aux activités anthropiques et des MNT à plus faible résolution pour aborder la reconnaissance des structures paléohydrographiques comme les anciens chenaux tout en limitant le bruit qui pourrait perturber la détection de ces structures.

Le choix de la résolution de la grille dépend aussi de la densité de points. La formule donnée par Yongxiang Hu (Hu, 2003) propose de faire correspondre la résolution de la grille à la densité de points au sol à la racine carrée de l'inverse de la densité de points de la manière suivante :

$$\text{Résolution max (m)} = \sqrt{(1/(\text{densité (pts/m}^2\ )))}$$

L'application de cette formule correspond pour la fenêtre de Mandeure à une résolution maximale d'environ 35 cm, ce qui nous a conduit à générer des grilles avec des cellules de 50 cm de côté. Cette résolution, adaptée à la plupart des endroits de la fenêtre, est trop élevée lorsque l'on se trouve dans des zones à faible densité de points, comme par exemple les forêts de résineux ou les zones densément urbanisées. Ainsi la figure 51 met en correspondance la densité de points (à droite) avec un ombrage simple obtenu à partir du MNT (à gauche). La zone indexée 1 correspond à un espace densément construit où l'on observe des artefacts de traitement liés à la présence des bâtiments. La zone indexée 2 correspond à un massif dense de résineux qui génère un artefact que nous avons appelé « peau d'éléphant » et qui résulte de la création artificielle d'un relief en marches d'escalier.

2.2.2.3.3 Visualisation des données sous forme cartographique

Les modèles numériques de terrain créés se présentent sous la forme d'un ensemble de pixels dont il est possible de faire varier la taille à l'envi. Il est maintenant nécessaire de visualiser ces données et de trouver le meilleur moyen de les représenter dans le but de les analyser et de les interpréter. La détection des structures est très importante car il n'existe pas à ce jour de méthode automatique pour déduire des structures à partir des anomalies du microrelief. Il revient donc à l'opérateur de repérer, cartographier et interpréter ces anomalies.

Il existe de nombreux modes de représentation (Devereux *et al.*, 2008 ; Kokalj *et al.*, 2011) dont la liste ci-dessous présente, d'une manière quasi exhaustive, les différents types. Ils vont des modèles les plus simples, c'est-à-dire de la représentation stricte de l'altitude en tout point, à des modèles bien plus perfectionnés et élaborés, faisant intervenir les ombrages, les relations entre les pixels et leurs voisins, etc.

Il n'existe pas, à notre connaissance, de mode de représentation standard des données permettant d'appréhender la totalité des anomalies du micro-relief détectables sur le terrain : certains sont plus précis, d'autres offrent une meilleure lisibilité. Certains fonctionnent très bien pour visualiser les petites anomalies du relief mais deviennent illisibles lorsque l'échelle augmente. Cette grande diversité des anomalies enregistrées impose d'utiliser des traitements variés et appropriés visant à rendre plus lisibles les anomalies et ainsi faciliter leur interprétation.

La visualisation sous forme altimétrique

Ce mode de représentation est le plus simple car il ne nécessite aucun traitement après la classification des points et la création du MNT. Chaque pixel est représenté avec son altitude (fig. 52a). La limitation de la méthode est évidente : elle est inappropriée lorsque dans une zone donnée la dynamique du signal* présente une amplitude très forte avec des variations d'altitude de l'ordre de plusieurs centaines de mètres. Il est alors impossible de détecter les micro-variations du relief (fig. 52b) avec l'affichage en 8 bits, soit 256 couleurs possibles. A titre d'exemple pour une dynamique du signal* comprise entre 210 et 600 m soit 390 m, comme c'est le cas à Mandeure, nous obtiendrons une couleur par tranche de 1,5 m.

Il est possible de choisir une gamme de représentation des valeurs plus serrées, mais il devient alors nécessaire d'utiliser plusieurs de ces gammes ce qui ne permet pas d'obtenir d'emblée une vision d'ensemble. On peut aussi se concentrer sur des zones de plus petites superficies ce qui va réduire évidemment la dynamique du signal ou alors choisir des entités particulières du contexte géomorphologique (par exemple un fond de vallée, les fonds de talwegs ou les sommets de plateaux (fig. 53). Sur cette figure, nous avons isolé le fond de la vallée du Doubs en éliminant toutes les altitudes supérieures à 370 m. Ce mode de représentation met alors clairement en évidence les variations du relief marquant les contours des terrasses alluviales quaternaires et le cours des anciens chenaux (fig 53b).

L'analyse par « bandelette »

Nous avons été amenés à créer un mode de représentation particulier : l'analyse par bandelette, dans le but de visualiser le relief de la plaine alluviale du Doubs en fixant l'altitude de ce dernier à 0 m. Pour ce faire, la plaine alluviale a été divisée en 200 bandes, larges de 20 m et longues de quelques centaines de mètres. Ces bandes sont orientées perpendiculairement au cours de la rivière (fig 54). On découpe ensuite littéralement le modèle numérique de terrain le long de ces bandelettes. Les altitudes sur chaque bande sont alors ramenées à la valeur 0 au niveau du Doubs. L'intérêt principal de ce mode de représentation est d'offrir la possibilité de lire les formations géologiques superficielles dans leur continuité et de pouvoir ainsi les cartographier plus aisément. Ces bandes permettent aussi d'obtenir des profils transversaux de la vallée à la demande (fig 54).

Les pixels de chaque bande sont par la suite transformés en points avec une valeur d'altitude. Puis on génère un variogramme afin d'interpoler par krigeage les points en une grille de pixels continus pour obtenir le modèle du fond de vallée (fig 55). Ce modèle d'une résolution d'environ 10 m est parfaitement adapté à l'analyse morphologique des formations géologiques quaternaires.

Les modèles ombrés

Les modèles ombrés simulent l'éclairage et les ombres créées par une source lumineuse dont la position (angle et élévation) est choisie (Burrough & Mc Donnel, 1998). C'est le modèle qui semble à première vue le plus simple. Il permet d'obtenir l'illumination hypothétique d'une surface en déterminant la valeur d'illumination de chaque pixel d'un raster. Cette illumination est déduite en fonction des cellules environnantes. Ce modèle permet de beaucoup améliorer la visualisation d'une surface pour son analyse. En effet, elle permet de s'affranchir des contraintes liées à la trop grande dynamique du signal altimétrique (cf. *supra*) (fig 52).

L'algorithme de calcul est le suivant :

$$Ombrage=255*(\cos(Zenith_{rad})*\cos(Slope_{rad}))+(\sin(Zenith_{rad})*\sin(Slope_{rad})*(\cos(Azimuth_{rad}-Aspect_{rad})))$$

Cette formule montre bien que la valeur d'illumination dépend de l'intensité (Slope, cf. *infra*) et de la direction (Aspect, cf. *infra*) de la pente, du zénith*, de la source d'éclairage et de l'azimut* de cette dernière. Le facteur 255 permet en fait de fonctionner en 8 bits.

La figure 56 schématise les effets de l'algorithme en fonction de l'anomalie micro-topographique et du choix de la position de la source d'éclairage.

Ces images en noir et blanc sont parfaites pour détecter de petites variations du relief même en observant l'image à grande échelle. Cependant la principale faiblesse de cette méthode est la perte du pouvoir de détection dans les pentes. Les pentes, face à la source d'éclairage, ont tendance à apparaître complètement éclairées alors que des zones d'ombre se créent dans les pentes à l'opposé de la source d'éclairage. La figure 57 présente un ombrage simple d'une même zone avec la même échelle de couleurs mais en faisant varier le contraste grâce à une égalisation par les écarts types. L'image 57a permet d'observer, avec une dynamique du signal s'étalant sur 2 sigmas, l'élévation

linéaire notée 1 correspondant à une rue antique détectée en prospection électrique ainsi qu'une série de chenaux notée 2. Par contre, il est impossible d'observer des anomalies du relief dans la zone notée 3 car la pente est dans une zone d'ombre. La dynamique du signal de l'image b est linéaire de 0 à 255. Il est très difficile d'y déceler les traces de la rue antique et des chenaux mais à l'inverse il est possible d'observer les micro-variations du relief dans la pente du coteau notée 3.

De plus, les structures parallèles à la source d'éclairage apparaissent car elles ne créent aucune ombre (fig 58). Sur cette illustration, la voie romaine encerclée en rouge «apparaît » en élévation lorsque l'on utilise un angle d'éclairage à 315 et à 270°. Elle peut sembler en « creux » avec l'ombrage à 135°, en raison de l'habitude de visualiser les ombrages des cartes créés à partir de source lumineuse provenant du nord-ouest. Elle est par contre quasiment invisible sur l'image b, correspondant à un ombrage résultant d'une source d'éclairage située au nord-est.

Ces deux exemples montrent qu'il est nécessaire d'utiliser plusieurs ombrages, d'orientation mais aussi de dynamique de signal différents, pour pouvoir détecter un maximum de variations du microrelief, quelles que soient leurs orientations et leurs positions topographiques.

Ce type d'approche, même s'il est très pratique au premier abord, nécessite l'utilisation de plusieurs ombrages afin d'être le plus exhaustif possible ; il ne permet donc pas une vision d'ensemble sur la même image. Toutefois l'ombrage 315_45, c'est-à-dire une position de 315° (depuis le nord) et une élévation de 45° est l'ombrage le plus couramment utilisé car c'est le même que celui utilisé pour simuler le relief dans les cartes IGN. Il permet une lecture initiale très rapide des cartes et constitue une sorte de norme de représentation de ce genre de document. La plupart des vues d'ensemble de ce travail possèdent souvent un drapage avec cet ombrage 315_45 car la lecture est conventionnelle, les creux et les bosses apparaissant au premier coup d'œil.

Les modèles ombrés composites

Pour s'affranchir des problèmes liés à l'utilisation des ombrages simples, il est possible d'utiliser des ombrages « composites » qui se basent sur un système d'ombres projetées plus sophistiqué.

Les multis-ombrages

Cette méthode consiste à calculer simultanément 16 ombrages suivant différents azimuts mais avec le même zénith. Ces données sont par la suite regroupées au sein d'une même image à 16 bandes d'informations. Il suffit alors de choisir trois bandes correspondant respectivement au rouge, au bleu et au vert. Cette méthode limite le manque d'information en cas de parallélisme entre la structure et la source d'éclairage.

Par convention, les trois bandes de base correspondent aux azimuts 315, 337,5 et 360 degrés, ce qui permet une lecture rapide de l'image. Un exemple de ce type de traitement est présenté sur la figure 59. La même zone est ici représentée suivant 4 ombrages différents. Le choix de représenter plusieurs ombrages sur la même image limite les effets négatifs liés au parallélisme entre une structure

et une source d'éclairage. La possibilité de jongler à souhait avec les différents ombrages peut aussi permettre de mieux apprécier une variation du relief.

Le principal problème de cette méthode de visualisation est qu'il n'est plus possible de traiter l'image a posteriori. Le fichier est considéré alors comme une image et non plus comme une grille d'information.

L'analyse en composantes principales

Cette méthode permet de représenter les 3 composantes principales sur 3 canaux (rouge, vert, bleu). Elle est basée sur l'analyse des 16 ombrages et elle représente environ 99% de la variance des données (Devereux et al, 2008). Cette méthode est utilisée pour représenter le maximum de données après un multiple ombrage en évitant les redondances. La figure 60 présente le rendu de ce traitement. Elle limite les effets de surexposition tout en facilitant la détection de petites structures (Devereux *et al.*, 2008).

Le « Mdow » ou ombrage multidirectionnel

Le Multidirectionnal, oblique-weighted, shaded-relief image (ombrage MDOW) est une combinaison de plusieurs ombrages (Mark, 2005). Cette méthode de visualisation permet, contrairement à l'ombrage simple, de limiter des problèmes de manque de visibilité dans le cas des structures parallèles à l'angle d'illumination ou dans les zones de pentes qui se révèlent parfois sur ou sous exposées suivant l'angle d'illumination choisi.

Il est composé de quatre sources d'illumination (225°, 270°, 315° et 360°) dont l'intensité varie en fonction du sens de la pente.

$$Mdow=Int(((W225*Om225)+(W270*Om270)+(W315*Om315)+(W360*Om360))/2)$$

La fonction « Int » est une troncature permettant d'obtenir un nombre entier et « Om » correspond à la fonction hillshade avec l'azimut choisi, le zénith étant fixé par convention à 30°.

La fonction W correspond au poids donné à chaque ombrage et se calcule comme suit :

$$W(\alpha)=\sin^2(Aspect-\alpha)$$

Cette formule doit être adaptée à cause des systèmes radiaux « différents » en :

$$W(\alpha)=\sin^2(((Aspect-90)-(\alpha-90))*\pi/180)$$

Avec α = 225°, 270°, 315° et 360°. La fonction Aspect, correspondant à la direction de la pente est décrite plus bas. Elle est tout de même dégradée par 3 fois en remplaçant à chaque fois chaque pixel par la valeur de la médiane afin de lisser la carte d'orientation des pentes et ainsi ne s'intéresser qu'aux variations basses fréquences.

Cette équation peut être représentée sur la figure 61, elle montre bien que le poids de chaque ombrage est maximal lorsque la pente lui est perpendiculaire. Il permet aussi de visualiser l'intérêt de diviser

la fonction Mdow par 2 (cf. formule du Mdow). En effet, pour un angle de pente donné, la somme des poids est égale à 2.

La figure 62 présente la même zone que celle illustrant l'effet de l'égalisation de l'image dans le cas des ombrages simples (fig 57). Le Mdow permet d'observer à la fois l'élévation correspondant à une voie romaine (1), des paléochenaux (2) ainsi que des anomalies du micro relief présents dans la pente du coteau (3).

Le « swiss hillshade »

Cet ombrage est composé de trois images superposées : un ombrage simple, un modèle numérique d'élévation et un effet de perspective (Barnes, 2002). Le modèle numérique d'élévation est situé sur le dessus, avec une transparence à 55%, puis vient l'ombrage avec une transparence à 35% et enfin la perspective aérienne. L'intérêt de cette représentation est sa capacité à combiner à la fois un MNT et un ombrage, le tout renforcé par une perspective (fig. 63).

Tous ces modes de représentation des données altimétriques sont au final dépendant d'une ou de plusieurs sources d'éclairage : ils ne représentent au final pas la donnée mais uniquement les ombres propres à cette dernière.

La fonction pente

Le calcul et la représentation de la valeur du pendage en tout point est un bon moyen d'observer les micro-variations du relief : en effet, les zones planes se détachent aisément des zones pentues et par exemple, dans le cas d'une bosse rectiligne, la structure se traduit par un replat linéaire encadré par deux petites pentes.

Le calcul de la pente pourrait se résumer à dériver le modèle numérique de terrain.

La valeur de la pente est en fait déterminée par la mesure des variations du relief à la fois d'un point de vue horizontal et vertical (c'est-à-dire longitude et latitude).

Prenons une grille de 9 pixels dont on connaît l'altitude, notés de *a* à *i* (fig 64). Nous voulons connaître la valeur de pente pour la case *e*.

a	b	c
d	e	f
g	h	i

Figure 64. Schéma d'une grille de 9 pixels (C. Laplaige, 2011)

Slope(°)= arctan(déviationHV)*180/π

Avec

$$déviationHV=\sqrt{(((dz/dx)^2+(dz/dy)^2))}$$

Ce qui se traduit, dans l'exemple présenté plus haut par :

$$dz/dx=((c+2f+i)-(a+2d+g))/(8*X)$$
$$dz/dy=((g+2h+i)-(a+2b+g))/(8*Y)$$

Où X et Y correspondent à la taille des cellules respectivement en longitude et en latitude.

Ce mode de visualisation est assez performant et facile à mettre en place, par contre, il ne permet pas de déterminer le caractère en « bosse » ou en « creux » d'une anomalie puisqu'il indique uniquement la valeur absolue de la pente (fig. 65).

Nous avons trouvé une façon simple de corriger cet inconvénient et d'arriver à lire le sens de la pente en différenciant les creux et les bosses : il suffit d'ajouter par transparence un ombrage azimuth 315°, élévation 45°. Cette technique permet automatiquement de comprendre si l'on se trouve face à une anomalie positive ou négative du relief. Le modèle est présenté figure 66.

On génère en utilisant le logiciel Arcgis, deux fichiers en sortie à partir du modèle numérique de terrain. La représentation de chaque fichier est déjà prédéfinie ce qui nous permet d'obtenir des images comme celle présentée sur la figure 67. Sur cette figure, la même zone est représentée suivant les valeurs altimétriques (67a), la pente (67b) et la pente avec un ombrage en transparence (67c)

La fonction « aspect » ou le sens de la pente.

Cette fonction permet d'extraire, pour chaque pixel, la direction de la pente ayant le plus fort gradient d'altitude. La valeur en sortie est présentée sous la forme du compas avec le Nord géographique à 0°/360° et une rotation dans le sens horaire.

Elle se calcule à partir d'une grille de 3x3 pixels, comme la fonction pente (fig. 68) et si la zone est totalement plane, c'est-à-dire que toutes les cellules de la maille 3x3 ont la même altitude, elle sera égale à -1.

$$Aspect(°)=180/\pi*\tan^{-1}(((dz/dy))/((-dz/dx)))$$

a	b	c
d	e	f
g	h	i

Avec :

$$dz/dy=((g+2h+i)-(a+2b+c))/8$$

et

$$dz/dx=((c+2f+i)-(a+2d+g))/8$$

Figure 68. Schéma d'une grille de 9 pixels

Cette valeur d'aspect est ensuite convertie en direction du compas en fonction des règles suivantes :

Si Aspect(°) < 0, alors *Pixel =90-Aspect(°)*

Si Aspect (°) > 0, alors *Pixel=360-Aspect(°)+90*

Sinon *Pixel=90-Aspect(°)*

Il existe deux façons de représenter cette fonction : l'une par une classification des valeurs suivant des orientations définies (fig 69) et l'autre par utilisation d'un signal étiré (fig. 70). Les orientations définies sont plutôt exploitées pour visualiser la carte à plus grande échelle. L'étude de l'orientation de la pente avec le signal étiré permet de détecter quelques structures archéologiques.

Sur cette figure 70, est encerclée de rouge une structure parcellaire qui n'est pas figurée sur le plan cadastral napoléonien du début du XIXème siècle; cet aménagement ancien de l'espace, probablement d'époque antique, est très peu visible sur l'ombrage simple.

Le chemin situé juste au sud, au pied de la colline est lui aussi bien plus visible grâce à la fonction aspect. Il est très difficile de lire le relief par cette méthode, mais elle est utile pour obtenir des informations complémentaires dans certains cas.

L'indice de position topographique (TPI)

Cette méthode de représentation, créée dans les années 2000 (Weiss, 2001 ; Jenness, 2006) consiste à soustraire à la valeur d'élévation de chaque pixel la valeur moyenne des pixels alentours. Il est possible de choisir le nombre de pixels pour calculer la valeur moyenne et leur forme de distribution, que ce soit un carré, un cercle ou un anneau, forme que nous allons utiliser car elle limite une partie du bruit.

Cette méthode est utile pour la restitution de petites variations topographiques tout en faisant abstraction de la pente sur laquelle elles se trouvent. La figure 71 montre un exemple de l'apport de ce type de rendu. Sur cette figure, les anomalies en élévation apparaissent en blanc et les anomalies en creux en noir. On observe clairement les traces de la fortification en cloche du *castrum* (1), de l'enceinte circulaire du sanctuaire du « Clos du Château » (2), des vestiges du théâtre antique (3) adossé au coteau qui le surplombe et en arrière duquel un petit bâtiment rectangulaire se dessine (4). Les anomalies linéaires et curvilignes visibles au sommet du coteau (5) correspondent au parcellaire napoléonien.

Les modèles locaux de reliefs dérivés du LiDAR (LRM)

Ce mode de représentation ressemble au TPI. Il consiste à soustraire un MNT d'origine par un MNT filtré (Humme *et al.*, 2006). Il permet de s'affranchir des ombrages et du modelé basse fréquence du terrain. Pour ce faire, on génère un nouveau MNT à partir de l'original en appliquant un filtre gaussien, par exemple la fonction « Gaussian filter » du logiciel SAGA©.

Il ne reste qu'à soustraire le MNT original par le MNT filtré, et l'on obtient un modèle comme celui présenté figure 72.

Ce modèle met en évidence les creux et les bosses par rapport aux mouvements « normaux du terrain » tout comme le TPI. Il permet une très bonne détection des structures mais il ne reflète pas vraiment les véritables dimensions de l'anomalie car celle-ci n'est pas totalement éliminée dans le modèle filtré mais seulement aplanie. Pour s'affranchir de ce problème, Ralf Hesse, durant ses travaux sur les données LiDAR du Baden-Württemberg, a mis au point une méthode en 2010 qui permet de retravailler le modèle (Hesse, 2010). Elle nécessite d'isoler tous les points du LRM d'une altitude égale à 0 (fig. 73).

Puis, on extrait toutes les altitudes des points du MNT d'origine correspondant aux points 0 du LRM calculé. On réinterpole un MNT à partir de ces points ce qui donne un MNT sans anomalies hautes fréquences. Il ne reste plus qu'à soustraire au MNT originel le nouveau MNT généré. On obtient alors uniquement les anomalies hautes fréquences présentes dans la zone prospectée par le LiDAR et ce avec leurs véritables dimensions, ce qui permet de calculer leur taille réelle.

Le comparateur de résistivité et d'indice de position topographique (CripT)

Nous avons développé cet outil afin de pouvoir comparer sur la même image les données de résistivité du sous sol aux variations du micro-relief. Le système qui consiste à jouer sur la transparence des couches ne convient pas dans ce cas précis. Dans la pratique, il est apparu finalement assez difficile de corréler précisément les structures tels que les bâtiments ou même un simple mur à des élévations micro-topographiques. Cet outil représente sur deux bandes le TPI et la résistivité (figure 74).

Le déroulement de la procédure suivi par le comparateur est le suivant. En entrée il faut définir le modèle numérique de terrain (MNT), la carte de résistivité du sol (carte de résistivité) ainsi que les paramètres du TPI ; nous conseillons d'utiliser un anneau de dimension 3 m pour le rayon intérieur et 10 m pour le rayon extérieur afin de limiter le bruit. A partir de la carte de résistivité, l'outil effectue un filtre passe bas de maille 3 x 3, puis le multiplie par -1 car la plupart des cartes de résistivité représentent conventionnellement les anomalies résistantes en noir soit proche de 0 dans les représentations 8 bits d'ArcGis. Cette astuce permet d'avoir un signal fort lorsque l'on se trouve en présence d'une anomalie bâtie. A partir du MNT, on effectue une transformation de chaque pixel par la valeur moyenne des pixels dont on aura choisi l'extension (dans le cas de notre exemple, un anneau de 3 et 10 m de rayon) et on soustrait au modèle numérique de terrain le modèle que l'on vient de calculer. On effectue un passe bas pour limiter le bruit (idem maille 3x 3). Il ne reste qu'à composer un nouveau raster multi bandes à partir de nos deux grilles (fonction « composite »).

La figure 75 présente un exemple de traitement appliqué à la reconnaissance de l'organisation du bâti antique en rive droite du Doubs. Sur cette image, dans une zone occupée actuellement par des champs cultivés, les structures électriquement résistantes du sous sol apparaissent sous la forme d'anomalies de couleur verte. Il se détache clairement un système de voies (V1, V2, V3) autour desquelles s'articulent des îlots d'habitation. Les anomalies positives du micro relief sont figurées

en bleu. Grâce à ce système, les structures résistantes du sous sol qui créent une élévation locale du relief apparaissent en bleu clair. Par exemple, l'élévation notée 1, initialement interprétée comme la matérialisation d'un tronçon de voie V2, correspond en réalité aux vestiges d'un portique effondré bordant cet axe de circulation. La voie V1, orientée perpendiculairement à V2, se marque sur toute sa longueur par une élévation en microrelief, alors qu'il n'existe plus d'élévation trahissant dans le relief la présence de la voie V3. La structure notée 2, marquée par une élévation remarquable dans la microtopographie correspond à l'emprise d'un petit temple.

Le Sky View Factor (SVF)

Cette méthode de traitement des données LiDAR, développée récemment, visualise la part de ciel visible autour de chaque point (Kokalj *et al.* 2011). Les traitements ont été effectués avec un module fonctionnant sur le logiciel ENVI © de la MSHE mais il existe une version « stand-alone » (fonctionnant seule) disponible sur le site de l'Institut d'Anthropologie et d'Etude Spatiale de l'Académie des Sciences de Slovénie. L'application de ce traitement a pour particularité d'améliorer considérablement la lisibilité de l'image en faisant ressortir les infimes variations du relief très difficilement détectables avec les autres modes de visualisation. Un inconvénient, cependant, est que le fort contraste a tout de même tendance à limiter la vision dans les zones de pente. Pour améliorer la détection, nous rajoutons un ombrage simple translucide postérieurement au traitement effectué avec Sky View Factor.

Un exemple d'application de ce traitement est présenté sur la figure 76. Sur cette image les pixels les plus clairs correspondent aux pixels d'où l'on peut observer la totalité du ciel, celle-ci étant matérialisée par une demi-sphère centrée sur le pixel et dont les paramètres (volume, forme) sont modifiables à loisir. A l'inverse, plus la teinte des pixels s'obscurcit, plus la part de ciel observable depuis cette position diminue. Il devient alors plus aisé de reconnaître dans cette zone du complexe monumental de la ville antique, l'empreinte de diverses structures archéologiques comme celle du tracé d'une voie antique (1), celle de l'aire de circulation enserrant le sanctuaire des « Clos du château » (2), ou celle de l'enceinte du castrum (3) mais également celles d'anciennes structures agraires apparues au dessus du théâtre et visibles sur le plan parcellaire cadastral napoléonien du début du XIXème siècle.

Cette présentation quasi exhaustive des traitements montre qu'il existe une grande variété de modes de représentation des données LiDAR. Chacuns concourent à leur façon et selon les situations, à une amélioration notable de l'identification visuelle et de l'interprétation des micro-variations altimétriques mesurées, même les plus infimes. Si le LiDAR est une méthode de prospection extensive d'une extrême précision, capable de s'affranchir de la couverture végétale, il reste toutefois inopérant sur les surfaces couvertes par les conifères et très limité dans sa capacité à générer des MNT dans les zones urbaines.

2.2.3 Conclusions sur les méthodes de détection

Il est intéressant de clore cette partie méthodologique par un tableau (fig. 77) récapitulant les différentes méthodes de prospection utilisées (interne ou externe), en fonction des paramètres du sol observés et/ou mesurés (couleur, relief, résistivité.) et des applications archéologiques et/ou géologiques

abordées (détection de vestiges construits, de structures sédimentaires,…). La complémentarité des différentes méthodes de prospection, illustrée par le nombre et la variété des paramètres mesurés, explique l'abondance et la diversité des données accumulées et la nécessité de recourir à un système d'information géographique, ici ArcGIS , pour pouvoir efficacement les confronter et les interpréter.

2.3 Le Système d'information géographique

2.3.1 Généralités

L'utilisation du système d'information géographique (SIG) est devenue très répandue en archéologie depuis quelques années. Les principales applications ont concerné le milieu urbain, avec la gestion foncière ou patrimoniale mais aussi l'étude de sites et de leur évolution spatiale et ce sur de grandes surfaces (Lorho, 2005 ; Noizet, 2006, Nuninger 2002, Thivet 2008).

Le SIG permet d'intégrer toutes les informations géoréférencées, de les mettre en correspondance, de les sommer et de les confronter quasi instantanément. En archéologie, l'utilisation des SIG s'impose dès l'instant où l'on s'intéresse à des espaces ou à des sites de grandes étendues sur lesquels on se propose de restituer l'organisation des occupations ou la dynamique environnementale à partir de méthodes d'investigation extensives (Aubry, 2003 ; Dabas *et al.*, 2005).

Ce travail intègre des données en grille (les rasters), des données vectorisées et des bases de données géographiques. La liste exhaustive de toutes les données utilisées et créées serait trop longue à énumérer ici, mais nous pouvons citer ici quelques couches d'information importantes qui rendent compte de leur diversité : limites administratives, anciennes ou modernes, occupation actuelle et ancienne du sol, photographies aériennes, hydrographie, topographie, microtoponymie moderne, plans de fouilles anciens et actuels, cartographies géophysiques, etc.

Beaucoup d'auteurs se sont interrogés il y a quelques années sur les questions de la taille des données en rapport avec les puissances de calculs et les capacités de stockage (Aubry, 2003 ; Dabas *et al.,* 2005). Les données XYZ des MNT obtenus par la prospection LiDAR représentent à elles seules 40 Go sous forme de fichiers texte. L'utilisation de disques durs de l'ordre du To (tera octet) et l'accès, par VPN (Réseau Privé Virtuel), au super calculateur de la MSHE Nicolas Ledoux font que nous n'avons pas rencontré de souci majeur dans le traitement et le stockage des données.

Troisième partie

Analyse comparée des signaux en fonction de situations géographiques variées – approche prospective et interprétation archéologique et géoarchéologique des sites



Illustration de la couverture de la troisième partie :

Association d'une orthophotographie, d'un SVF et de la carte électrique du sous-sol au secteur des «Combottes» (C. Laplaige, 2011)

3. Analyse comparée des signaux en fonction de situations géographiques variées – approche prospective et interprétation archéologique et géoarchéologique des sites

Dans cette troisième partie, seront examinées, à des échelles d'exploration différentes et selon des situations géographiques variées face aux phénomènes d'érosion* ou de recouvrement, les potentialités respectives de différentes méthodes de prospection à reconnaitre ou à détecter divers types de structures de nature archéologique ou pédo-géologique. Le choix des zones de test s'est fait selon deux critères.

Le premier critère pris en compte est l'intérêt archéologique ou géologique supposé de la zone à prospecter par rapport à des problématiques de recherche envisagées : par exemple la cartographie de chenaux anciens dans un secteur de la plaine alluviale ou la délimitation des contours de sites d'habitats ruraux d'époque antique.

Le second critère concerne les spécificités du contexte géomorphologique et environnemental de chacun des sites choisis en fonction de leur implantation sur plateau ou dans le fond de vallée, sur sol nu ou en milieu boisé, en zone rurale ou péri-urbaine. Les zones de test sont présentées en trois catégories de sites :

- les sites sous couvert boisé, difficilement accessibles aux méthodes conventionnelles de prospection mais à priori relativement bien préservés des perturbations,
- les sites de plateau ou de plaine situés sur sol nu ou prairie, beaucoup plus accessibles par contre à ces méthodes mais davantage soumis aux phénomènes géologiques d'érosion ou de recouvrement mais aussi parfois à la pression anthropique,
- les sites situés en zone péri-urbaine, milieu d'accès plus ou moins aisé et présentant, selon les méthodes, certaines limitations à leur application.

Par ailleurs, dans le but d'augmenter la diversité des cas traités, deux exemples d'application ont été choisis dans des milieux forestiers autres que ceux du Nord Franche-Comté, comme celui la forêt de Chailluz près de Besançon ou ceux des forêts de Sarrebourg, en Lorraine (fig.78).

Chaque cas d'étude a bénéficié de la réalisation d'une couverture LiDAR et d'au moins une ou plusieurs prospections géophysiques documentant indifféremment les problématiques de recherche, qu'elle soit archéologique ou paléoenvironnementale. Par contre, d'un site à l'autre, la connaissance archéologique restait très variable, que ce soit par rapport aux sources anciennes (plans, cartes…) ou aux sources plus récentes comme les fouilles ou les repérages ciblés de sites par la prospection LiDAR.

Pour chaque site et en fonction des problématiques de recherche s'est naturellement posée la question du choix (de la) ou des méthodes les plus appropriées à leur reconnaissance et de l'ordre dans lequel elles devaient intervenir. Selon les cas, nous avons choisi d'employer une ou plusieurs

méthodes en fonction de leur aptitude à répondre ou non, et de façon complémentaire, c'est-à-dire méthodologiquement non redondante, aux questions posées dans le cadre de chaque problématique. En géophysique appliquée, des méthodes ne mesurant pas les mêmes propriétés physiques du sol, comme la résistivité et l'aimantation, ont été préférentiellement choisies. Un autre critère de choix prépondérant a été la rapidité et la facilité de mise en œuvre des équipements de mesure, ainsi que leur disponibilité. Enfin le dernier facteur a été le temps qui pouvait être raisonnablement consacré à l'exploration de chaque site, celui-ci était contraint par l'état des parcelles et leur accessibilité par rapport au calendrier des récoltes et des travaux agricoles. Tous ces éléments impliquent qu'au bout du compte la stratégie d'exploration de chaque site a résulté d'un compromis entre la satisfaction d'exigences méthodologiques et les moyens matériels, humains et financiers qui pouvaient leur être consacrés.

3.1 Les recherches sous couvert boisé

Les études archéologiques menées en milieu boisé sont nettement moins nombreuses que celles menées sur sol nu ou dans les zones urbanisées (Buchsenschutz *et al.*, 2004 ; Ferdière, 2006). Cette disparité a plusieurs origines:

- le milieu forestier apparaît comme un milieu assez méconnu au plan archéologique ; il est relativement épargné par les grands travaux d'aménagement qui justifient, obligatoirement et préalablement à leur réalisation, d'opérations de diagnostic archéologique.

- le milieu forestier est un milieu peu adapté à la détection des vestiges par la prospection aérienne et peu propice à la prospection au sol ou plus exactement à l'observation à l'œil nu des traces matérielles de son occupation (Ferdière, 2006). La couverture du sol par les feuilles et les branches limite la prospection à vue et en l'absence de labour, il faut se contenter des chablis pour espérer une remontée du matériel archéologique à la surface. De plus la présence de racines en sous sol perturbe la plupart des prospections géophysiques (Kvamme, 2001).

Mais, grâce aux prospections LiDAR, il est désormais possible de détecter des vestiges archéologiques sous forêt d'une manière extensive. Aussi il paraît intéressant de confronter a posteriori l'organisation reconnue d'anomalies microtopographiques structurant des sites archéologiques aux données recueillies via les prospections pédestres et les prospections géophysiques. Exceptionnellement, les deux cas d'études présentés se situent à l'extérieur de la zone d'étude. L'un concerne la forêt de Chailluz près de Besançon et l'autre des forêts au nord de la ville de Sarrebourg (Moselle).

3.1.1 Etude d'enclos en Forêt de Chailluz (Doubs)

Dans le cadre du programme LIEPPEC, Catherine Fruchart a débuté sa thèse intitulée « Analyse spatiale et temporelle des paysages de la forêt de Chailluz (Besançon, Doubs) de la Préhistoire à nos jours ». La problématique de cette thèse vise à caractériser l'occupation et l'exploitation du massif forestier de Chailluz au cours des siècles passés afin de mieux comprendre l'histoire et l'évolution de cette zone. Cet espace boisé communal, situé à la périphérie de Besançon est la cinquième forêt communale de France de par sa superficie (fig. 79) et demeure aujourd'hui encore assez méconnue (Fiétier, 1973 ; Muller, 1999 ; Bépoix 2010).

La caractérisation des occupations dans la forêt de Chailluz s'est faite à partir de l'exploitation des informations microtopographiques fournies par la couverture LiDAR (programme LIEPPEC) couplée à un important travail de vérification et de validation sur le terrain (prospection au sol et au détecteur de métaux) réalisé en collaboration avec des membres de l'Association de Recherche et d'Etude des Sites Archéologiques Comtois (ARESAC).

A titre expérimental, nous avons effectué des prospections magnétiques sur trois enclos repérés grâce à la technologie LiDAR (fig. 80). Ces trois enclos sont distants au maximum d'un kilomètre et situés à l'extrémité occidentale de la forêt de Chailluz, et plus précisément au sommet et sur les flancs du coteau dit du « Bois de la Lave ».

Le but des prospections était de confirmer la présence de structures pouvant être reliées à de l'habitat, les fouilles n'étant toujours pas autorisées dans ce secteur. La prospection magnétique avec l'appareil Grad-601 a été préférée car l'équipement est léger et facile à mettre en oeuvre. De plus, la prospection magnétique est la moins sensible à la présence de racines en sous sol (Kvamme, 2001). Cependant, la présence des nombreux arbres a compliqué l'acquisition des données en nous empêchant assez souvent d'effectuer un parcours parfaitement régulier et rectiligne des profils de mesure.

3.1.1.1 L'enclos n°1

3.1.1.1.1 Aperçu microtopographique et chronologique

Cet enclos de forme quadrangulaire et d'environ 35m de coté est fermé sur 3 cotés (sud, est et ouest) par un muret en pierres sèches qui se marque sur l'image LiDAR par une élévation bien visible, notamment sur son côté sud-est, qui est le mieux exposé par rapport à la position de la source d'éclairage 315_45 (fig. 81). L'extrémité nord de l'enclos est soulignée par la présence de deux murgers (tas de pierres). A l'ouest de cet enclos, on note la présence de deux plateformes de charbonnier.

Le matériel retrouvé dans cet enclos était composé d'une fibule, de deux monnaies des Ier et IIème siècles, d'une charnière de coffre, de quelques débris de sigillée, ainsi que de nombreux clous à tête rondes et plates laissant supposer la présence d'un habitat antique (Daval & Fruchart, 2011).

3.1.1.1.2 Résultats de la prospection magnétique

La prospection s'est déroulée durant le printemps 2011 : elle a consisté en l'exploration d'un bloc de 40 x 40 mètres approximativement centré sur l'emprise de l'enclos. Même si la plus grosse partie de la végétation basse a pu être enlevée, il subsistait néanmoins des obstacles comme les arbres encore en place mais également les troncs couchés. Il devenait alors très difficile d'effectuer des profils précis et régulier sur un terrain aussi accidenté, comme le montre la partie nord de la prospection où il a fallu sans cesse baisser ou lever les capteurs ou bien se décaler vers la gauche ou la droite par rapport à l'axe des profils. Les résultats de la prospection magnétique sont visibles sur la figure 82. Nous avons représenté en densité de gris la carte du gradient magnétique avec une dynamique de signal comprise entre les valeurs -15 nT/m (en blanc) et +15 nT/m (en noir). Sur cette carte, très bruitée, on ne distingue pas le talus, par contre, au niveau de l'angle est de l'enclos apparait une série de 16 anomalies positives du gradient magnétique, probablement des fosses, espacées de 2,5 à 3 m, qui dessinent 2 formes de quadrilatère. Aucune autre organisation remarquable n'est identifiable à l'intérieur de l'enclos et il est loisible d'interpréter ces anomalies comme des structures fossoyées matérialisant les vestiges de bâtiments sur poteaux.

Une autre anomalie positive du gradient est visible au centre de l'enclos sans qu'il soit possible pour le moment de la relier à une structure particulière.

3.1.1.1.3 Conclusion

En dépit des difficultés évoquées précédemment et qui affectent la lisibilité de la carte, cette prospection magnétique apporte de nouvelles informations notamment sur la structuration interne de

l'enclos. Cependant certaines des structures fossoyées détectées se localisent sous le talus de l'enclos suggérant un calage imprécis de la prospection. Dans ce contexte de forêt dense, notre technique de géoréférencement des angles de la prospection par GPS s'est révélée ici inefficace. C'est pourquoi nous avons choisi par la suite d'utiliser des points remarquables identifiables sur la prospection LiDAR (borne, angle de voie…) afin de recaler plus précisément nos blocs. Une autre remarque est que, malgré la fréquentation assidue de la forêt par les chasseurs, promeneurs, et joggeurs, la zone prospectée est apparue peu polluée par les ferrailles erratiques.

3.1.1.2 L'enclos n°2

3.1.1.2.1 Aperçu microtopographique et chronologique

L'enclos n° 2 se situe à flanc de coteau, non loin de l'autoroute A36. Il est conservé en élévation sur trois cotés sous la forme de murets en pierres sèches parfaitement identifiables sur la prospection LiDAR (fig. 83). Le grand coté orienté nord-ouest/sud-est est long de 30 mètres. Les deux cotés orientés nord-sud et nord-est/sud-ouest ont une longueur respective de 25 et 29 m. On remarque également la présence d'une charbonnière située à l'est de l'enclos et installée sur un espace plan et légèrement surélevé ainsi que celle de deux murgers (tas de pierres) à l'intérieur de la structure. De plus, on soupçonne la présence d'un grand chemin creux, en grande partie comblé, et dont le tracé d'orientation nord-ouest/sud-est traverse l'ensemble de la côte.

Des clous à tête ronde et plate ont été découverts à l'intérieur de l'enclos ainsi qu'une hipposandale le long du muret au sud-est et à l'extérieur. Les clous ont été attribués à l'époque antique car ils présentent une forme identique à celle des clous retrouvés dans le premier enclos (*cf. supra*) en association avec une fibule, des monnaies et de petits fragments de sigillée.

3.1.1.2.2 Résultats de la prospection magnétique

Les résultats de la prospection magnétique effectuée sur une surface de 80 x 40 mètres sont présentés figure 84. Nous avons choisi de présenter cette fois la carte obtenu pour un champ magnétique simulé à 30 centimètres de haut. Les anomalies magnétiques positives sont figurées en noir et les négatives en blanc. La prospection magnétique permet de détecter l'anomalie d'un probable muret en pierres sèches à l'intérieur de l'enclos (1) dont on devinait seulement l'existence sur l'image LiDAR. On signalera toutefois que cette anomalie du microrelief n'est pas visible sur le terrain.

Dans l'enclos, on identifie clairement 6 anomalies magnétiques positives, caractéristiques de structures fossoyées (fosses) et dont 3 sont situées le long du talus sud-ouest et 3 autres plus à l'intérieur. On détecte aussi un fossé (5) et une anomalie négative (6) (muret ?) orientés parallèlement au côté sud-est de l'enclos. On pourrait imaginer que le muret noté 6 se prolonge vers le sud, au-delà de l'enclos, comme le suggère la légère inflexion visible dans la topographie et dont le tracé a été souligné par trois flèches noires.

A l'extérieur de l'enclos, le chemin creux (sentier entre 2 talus) apparaît bien comme une anomalie magnétique positive signe très probable d'un remplissage du chemin par colluvionnement* (3). Une

structure semblable, d'orientation nord-est/sud-ouest apparaît aussi (4) perpendiculairement à l'axe du chemin creux. C'est sur le tronçon de ce chemin qu'a été découverte l'hyposandale. Autour de la charbonnière, on observe une série d'anomalies magnétique positives que l'on pourrait interpréter, à ce niveau de travail, comme les fosses d'extraction de matériaux nécessaires à l'installation de la plate forme de charbonnier.

3.1.1.3 L'enclos n°3 dit du « vieux tilleul »

3.1.1.3.1 Aperçu microtopographique et chronologique

Cet enclos correspond en fait à une série d'élévations constituées de pierres sèches dont l'organisation dessine le tracé de deux enclos mitoyens ou superposés (fig. 85). L'enclos le plus étendu délimite un espace d'environ 33 mètres de côté sur 28 (1) alors que le second forme approximativement un carré de 20 mètres de coté (2). L'élévation la plus septentrionale se prolonge vers le nord-ouest pour rejoindre un ensemble d'anomalies en relief dessinant probablement l'empreinte d'un ancien parcellaire (3).Plus à l'est enfin, on repère sur l'image quatre murgers alignés parallèlement aux murs de l'enclos et dont deux se situent à l'intérieur.

L'enclos septentrional (1) est recoupé par un chemin qui joue aussi le rôle de limite communale. Trois autres chemins (4, 5 et 6) sont également visibles, la chemin 4 est d'époque moderne alors que les deux autres semblent aujourd'hui inutilisés.

Le matériel retrouvé (point orange) se localise dans l'enclos (1) et se compose de céramique et de clous à tête ronde probablement d'époque Antique.

3.1.1.3.2 Résultats de la prospection magnétique

Les résultats de la prospection magnétique sont présentés figure 86. Il s'agit de la prospection d'un bloc de 40 x 40 m implanté à cheval sur les deux enclos Sur cette carte du gradient magnétique, la dynamique de signal s'étale de -10 nT/m à +10 nT/m (du blanc au noir). Le prolongement dans la zone prospectée du tracé des murets est peu visible. On observe en (1) une anomalie sinueuse évoquant le tracé d'un ancien chemin ; celui-ci semble aboutir à une anomalie positive (2), de forme assez étendue, qui correspond à une grosse structure en creux (citerne ?). Plus à l'est, 4 anomalies magnétiques négatives et rectilignes pourraient matérialiser les fondations des murs (3) d'un bâtiment orienté parallèlement à l'allongement de l'enclos et recoupé postérieurement par le chemin menant à la citerne.

Au sud-ouest de ce bâtiment construit, on distingue nettement 4 anomalies positives du gradient (fosses ?) implantées aux quatre coins d'un espace carré de 10 x 10 mètres. Cette disposition laisse penser que nous pourrions nous trouver en présence des vestiges d'un bâtiment sur poteaux matérialisant un état d'occupation distinct du précédent.

La prospection géophysique fait ainsi apparaître dans cette zone d'enclos n°3 la présence probable d'aménagements successifs insoupçonnée auparavant : possible bâtiment sur poteaux d'abord, recoupé par un bâtiment à plusieurs pièces reposant sur des murs, et enfin un dernier état où un

chemin recoupant les structures précédentes mène à une grande structure fossoyée qu'on interprèterait volontiers comme une citerne. L'état intermédiaire, auquel se rattache le bâtiment à plusieurs pièces, est certainement à associer au système d'enclos observé sur les données LiDAR, et vraisemblablement à rattacher à la période romaine, surtout si l'on considère son orientation, intégrée parfaitement dans l'organisation de l'espace reconnu comme antique dans cette partie nord-ouest de la forêt de Chailluz.

3.1.1.4 Conclusion

En conclusion, et grâce à la technologie LiDAR, le nombre de sites archéologiques connus dans la forêt de Chailluz a considérablement augmenté. Dans ce milieu forestier, les prospections au sol et au détecteur de métaux ont montré leur capacité à acquérir le mobilier nécessaire à l'interprétation et à la datation des structures détectées. Dans cet environnement peu propice à leur mise en œuvre, les prospections magnétiques, ont apporté nombre d'informations souvent inédites sur la structuration et l'occupation de ces sites, informations au demeurant inaccessibles aux deux autres méthodes de prospection. Au vu des résultats, enregistrés dans ce programme, c'est bien en termes de complémentarité que doit être envisagé le recours aux méthodes de prospection.

3.1.2 Etude des mares intra-forestières de Lorraine

L'absence de structure sous couvert boisé nécessaire pour coupler les données géophysiques, sédimentaires et microtopographiques nous a conduit vers les massifs forestiers de Lorraine où, dans le cadre d'un BQR*, une étude sur un objet appelé « mardelle » a été réalisée. Ces structures étudiées en partie par David Etienne au cours de son doctorat (Etienne, 2011) sont de petites dépressions humides qui depuis une vingtaine d'années suscitent de plus en plus d'intérêt pour les écologistes (Thoen & Herault, 2006 ; Herault & Thoen, 2008, 2009) et sont identifiées en tant qu'îlots majeurs de biodiversité. L'origine anthropique de ces structures, qui ne laissait aucun doute au début du siècle (Wichman, 1903 ; Linckenheld, 1927), a été remise en question par des partisans d'une origine naturelle, par dissolution de lentille de gypse (Delafosse, 1948) ou par dissolution lente de carbonate de surface (Couteaux, 1969). Récemment de nouvelles études intégrées proposent à nouveau une origine anthropique à ces structures (Gillijns *et al.*, 2005 ; Vanwallegem *et al.*, 2006 ; Etienne *et al.*, 2011).

3.1.2.1 Description de l'objet « mardelle »

Les mardelles de Lorraine sont des structures d'une superficie d'environ 350 m², de forme généralement circulaire ou ovoïde et d'une profondeur de 2 à 5 m, elles peuvent être en eau ou entièrement comblées. Les sondages et fouilles menés ont montré que ces structures ont une forme de « baignoire», avec des pentes de l'ordre de 50 à 60% et un fond plat (Goepp, 2010 ; Etienne *et al.*, 2011). L'ensemble des datations radiocarbone faites sur les fonds sédimentaires de ces structures suggèrent un début de sédimentation contemporain de la fin de l'Age du Fer et/ou du début de l'époque romaine.

Une reconnaissance LiDAR aéroportée effectuée préalablement à la construction de la ligne LGV Metz-Strasbourg révèle plusieurs centaines de ces structures, implantées aussi bien en contexte agricole que boisé. Leur densité peut atteindre une vingtaine de mardelles par km² dans les zones boisées les plus

denses (Etienne, 2011). D'un point de vue paysager, ces structures sont préférentiellement distribuées sur les sommets ou les hauts de pentes. La figure 87 présente un exemple de leur répartition sur le plateau lorrain.

Plusieurs de ces structures ont pu être fouillées ou prospectées par l'INRAP dans le cadre des travaux d'archéologie préventive à la construction de la ligne LGV Metz-Strasbourg. Ils renseignent la morphologie et le remplissage de ces structures ainsi que leur implantation au sein du substratum géologique.

Toutefois, la fouille destructive de ces structures ne peut être envisagée que dans le cadre de ce type d'opération puisque ces mares intra-forestières sont actuellement intégrées dans une politique de préservation de la biodiversité qu'elles abritent, par différents organismes gouvernementaux (Natura 2000, Parc Naturel). Les fouilles et les sondages destructifs ne sont par conséquent pas envisageables sur les structures situées hors du tracé de la ligne LGV et improbables dans le futur.

La prospection géophysique est donc un outil indispensable afin de continuer l'étude de ces systèmes et livrer de nouvelles données sur leur morphologie et leur remplissage de manière non destructive. La prospection électrique et la prospection radar-sol ont donc été testées sur deux de ces systèmes, localisés au nord et au nord-ouest de la ville de Sarrebourg (fig. 88).

3.1.2.2 La mardelle de « Belle Forêt » (Bisping, Moselle)

La mardelle de « Belle forêt » est implantée sur les marnes irisées du Keuper inférieur, en forêt Domaniale de Fenétrange. Une tomographie électrique a été effectuée afin d'étudier la forme du remplissage (fig. 89). Le dispositif est composé de 36 électrodes, espacées d'un mètre, en configuration de mesure dipôle-dipôle. La structure est en grande partie comblée, sans lame d'eau en surface, ce qui a facilité la mise en place du dispositif.

Le résultat de la prospection présenté ici (fig. 90) est obtenu après la quatrième itération de la modélisation des données brutes. Les structures horizontales sont privilégiées et une inversion robuste est utilisée pour limiter les effets du corps résistant en surface au niveau de P1. La topographie de la pseudo-section de résistivité a été acquise avec une nivelle de chantier.

Le remplissage apparait plus conducteur (23 Ωm) que les marnes encaissantes (30-35 Ωm). Cette différence est probablement liée à la différence d'humidité entre sédimentation (matière organique, argile) et substrat géologique (marne). Le remplissage de la mardelle s'étend sur une longueur d'environ 24 m. Les « bords » de la structure se retrouvent en P1 et P2 avec une transition entre le substrat géologique et la sédimentation particulièrement visible en P1. Toutefois, la faible profondeur d'investigation ne permet pas d'atteindre le fond de la structure. Il n'est également pas possible de différencier des couches de résistivité, et donc une stratigraphie, au sein du comblement alors que les toutes les fouilles et les sondages précédents ont décrits plusieurs unités sédimentaires parfaitement différenciables (Goepp, 2010 ; Etienne, 2011).

3.1.2.3 La mardelle de Dolving (Moselle) (Kohljungswald)

3.1.2.3.1 Contexte de l'intervention

La mardelle de Dolving est située sur le calcaire coquillier du Muschelkalk (Trias) et implantée dans la forêt du Kohljungswald, au nord de Sarrebourg (fig. 88). Cette forêt peut être considérée comme une forêt « ancienne » (Dupouey *et al.*, 2007 ; Peterken & Game, 1984), car sa présence est signalée sur les plus anciennes cartes disponibles dans cette région (carte des Naudin, 1/28 800^{e}, 1728-1739).

La prospection radar a été effectuée à la fréquence de 225 Mhz, à partir de 24 profils transversaux espacés de 1 m, avec une mesure tous les 25 cm. Elle recouvre les trois-quarts de la dépression préalablement déblayée des nombreux bois qui l'encombraient. Un profil longitudinal *test* a également été effectué. Par ailleurs, les profils radar ont été corrigés en référence au levé micro-topographique effectué aux abords de la structure à l'aide d'un tachéomètre suivant un pas de mesure de 25 cm (fig. 92). Enfin, un sondage manuel (carottier russe) a été réalisé au centre de la structure afin de pouvoir confronter la profondeur d'apparition des différents faciès sédimentaires (FS) aux profondeurs des réflecteurs identifiées par la prospection radar.

3.1.2.3.2 Calibration du signal radar-sol selon la nature du sédiment

Les variations du taux d'humidité dans les sédiments entraînent des variations de vitesse des ondes émises par le dispositif radar-sol (Conyers & Goodman, 1997). Il est donc nécessaire de mesurer cette valeur sur l'ensemble de la stratigraphie afin de calibrer le signal radar-sol. La séquence prélevée est donc échantillonnée tous les 2 cm à volume constant (Ø 1,2 cm). La Densité Sèche (DS), le pourcentage d'humidité (% Humidité), de Matière Organique (% MO) et de Silicates (% Si) sont quantifiés pour chaque échantillon en utilisant la méthodologie classique de la perte au feu (Loss In Ignition, LOI).

Avant cet échantillonnage des mesures de susceptibilité magnétique sont également réalisées sur l'ensemble de cette séquence de Dolving. Les variations concordantes de la densité sèche, du pourcentage de matière organique et de la susceptibilité magnétique permettent d'identifier quatre phases sédimentaires (FS) (fig. 93).

La première, FS1a, correspond à une couche argilo-organique de 40 cm d'épaisseur dont la susceptibilité magnétique oscille entre -0,9 et 3x10^{-6} SI et le taux d'humidité médian est d'environ 66%. La seconde, FS1b, correspond à une couche principalement constituée de matière organique, sur 50 cm d'épaisseur avec une susceptibilité magnétique proche de 0 et un taux d'humidité très important (environ 86%).

Au-delà, la valeur de la susceptibilité magnétique croît brusquement, de 0 à 5 x10^{-6} SI en quelques centimètres alors que le taux de MO diminue très fortement (de 80 à 10%). Cette évolution marque la transition entre la couche organique (phase FS1b) et la couche argilo-organique (phase FS2a). Cette couche, d'une vingtaine de centimètres et d'un taux d'humidité d'environ 50%, connaît une augmentation régulière de sa susceptibilité magnétique de 5 à 6 *10^{-6} SI. La quatrième phase (FS2b)

se rapporte à la couche la plus profonde qui est argileuse et épaisse de 60 cm. Son taux moyen d'humidité est d'environ 40 % et sa susceptibilité magnétique augmente progressivement, de 6 $x10^{-6}$ SI au sommet de la couche à 8 $x10^{-6}$ SI à sa base.

Le substrat calcaire est atteint à la cote -243 cm. Au vu des résultats le remplissage de la mardelle peut être caractérisé en tant que succession de deux faciès sédimentaires, l'un plutôt organique (FS1) et l'autre plutôt argileux (FS2).

3.1.2.3.3 Apport de la reconstitution radar-sol aux les mesures de perte de sol

Les mardelles sont des petits capteurs sédimentaires, elles accumulent au cours des siècles des sédiments qui proviennent de leurs bassins versants. Cette étude et celles conduites sur d'autres remplissages fournissent des éléments de datation ainsi que des informations sur l'érosion (perte au feu, modélisation du bassin versant) et sur l'occupation ancienne (palynologie) des sols environnants.

A l'heure actuelle, les datations radiocarbone AMS (14C) et les analyses polliniques sur la séquence du Kohljungswald sont en cours de réalisation. Toutefois, les données actuellement disponibles (radar-sol, LiDAR et LOI) peuvent être utilisées pour proposer des calculs de pertes de sols à l'échelle du bassin versant pour chacun des faciès sédimentaires identifiés (FS1 et FS2). Pour ce calcul, il est nécessaire de mesurer précisément la taille du bassin versant (LiDAR), le volume accumulé pour chacune des unités sédimentaires (radar-sol) et de quantifier la proportion de matériel allochtone (LOI) provenant du bassin versant.

3.1.2.3.4 Délimitation et mesure du bassin versant

La délimitation de la superficie du bassin versant s'avère problématique puisque ces structures sont localisées en position topographique sommitale. Les faibles pentes et les faibles variations altitudinales rendent dès lors inefficace la délimitation du bassin versant à partir des outils *ArcHydro* utilisés dans ArcGIS.

Toutefois, la finesse de la résolution de l'image LiDAR peut cependant nous y aider. A l'échelle micro-topographique, il a été possible de délimiter de façon manuelle le bassin versant, à partir des orientations de pente (*Aspect*) et du modèle altimétrique. Ce modèle est soumis à un filtre passe bas afin de limiter les bruits causés par des aménagements modernes. Les pixels du modèle, d'une taille initiale de 0,33 m ont été ensuite agrégés pour former une nouvelle grille avec des pixels de 1 m de côté.

La zone délimitée recouvre une surface de 1836 m² à laquelle il faut soustraire la surface de la zone de captation (415 m²), ainsi le bassin versant mesure 1421 m² (fig. 94).

3.1.2.3.5 Modélisation du réceptacle

A l'inverse des fouilles archéologiques, la prospection géophysique offre la possibilité de reconnaitre rapidement la morphologie et la stratification de ce milieu de dépôt et de calculer précisément les volumes de chaque faciès sédimentaires (organique, argileux).

En premier lieu, nous avions utilisé pour l'interprétation des données radar des vitesses de propagation des ondes dans le sous-sol de 4 cm/ns que nous avions obtenu en pointant les hyperboles de diffraction. Les mesures du taux d'humidité permettent de corriger ces valeurs (Scollar *et al.*, 1990).

En attendant de compléter la prospection, nous devons faire une approximation du volume total en divisant les volumes de chaque FS par le pourcentage de la surface prospectée, c'est-à-dire 310 m² sur les 415 m² de la mardelle soit 75%.

La figure 95 présente tous les profils radar dont un sur lequel sont figurées les limites des deux faciès sédimentaires caractérisés. Trois réflecteurs (en rouge) sont identifiés sur cette figure et correspondent au sommet de FS1, à la transition entre FS1 et FS2 et au contact entre FS2 et le substratum géologique.

L'anomalie notée 1 (fig. 95b) correspond probablement à la réflexion provoquée par un tronc ou une branche à la surface de FS2. Le contact entre le remplissage sédimentaire et le substrat géologique sur les bordures de la structure (section notée 2) sont difficilement identifiables. Ceci est certainement lié à la position « à cheval » des antennes d'émission et de réception dans cette zone de contact.

La prospection radar-sol révèle une morphologie dissymétrique, avec un flanc sud plus pentu (40°) que le flanc nord (20°) et un fond « plat ». Cette particularité géométrique est concordante avec les résultats obtenus lors de la fouille sur le site de Bisping par l'INRAP en 2009 (Goepp, 2010).

Une image tri-dimensionelle peut être générée pour chacune des interfaces en les pointant manuellement sur chacun des profils (fig. 96). A la saisie du modèle, nous avons utilisé un point tous les 50 cm le long de chaque profil espacé de 1 m. Ces grilles sont ensuite interpolées par triangulation linéaire afin de générer des rasters suivant une maille de 0,5 par 0,5 m.

Le logiciel *Surfer* permet une mesure précise du volume de sédiment contenu entre chacune des interfaces en utilisant la fonction *Volume*. Elle transforme ce volume en un nombre de prismes égal au nombre de cellules. Chaque prisme ayant une hauteur égale à la distance entre les deux interfaces, il suffit ensuite de les sommer pour obtenir le volume total.

Ainsi nous obtenons un volume de 127,7 m^3 pour FS1 et un volume de 133,6 m^3 pour FS2. Il est finalement nécessaire de ne conserver que 75% de ces valeurs, correspondant à la proportion de surface effectivement prospectée, pour obtenir le volume estimé de chaque faciès soit 170,3 m^3 pour FS1 et 178,1 m^3 pour FS2.

3.1.2.3.6 Calcul des pertes de sol

Le résultat des mesures de perte au feu, de la surface du bassin versant et de la quantification des volumes des faciès sédimentaires sont croisés afin de proposer une mesure des pertes de sols (en mm) à l'échelle du bassin versant selon les faciès (Bossuet *et al.*, 1996). Le flux de matériel allochtone somme, pour le moment, de façon indifférenciée les proportions de carbonates et de silice.

Le taux d'accumulation (g/faciès) est calculé en multipliant la valeur de densité sèche des matériaux allochtones (g/cm^3) par le volume de chaque faciès. La surface de la mardelle (m²) est intégrée au

calcul afin de retranscrire la perte de sol (mm/FS) sur le bassin versant. Ce calcul nécessite de fixer une masse volumique des sols érodés, soit 1 t/m^3 en se basant sur la mesure de densité d'échantillons de sols de l'horizon A actuel.

La masse de sédiments allochtones accumulés dans FS1 est de 170,3 t multipliée par la masse volumique moyenne de sédiments allochtones de cette couche (0,05 g/cm^3) soit 8,5 tonnes. Le même calcul est effectué pour FS2 et permet d'obtenir une masse égale à 149,62 t.

Si l'on rapporte ces valeurs à la superficie du bassin versant (1421 m²), les pertes de sol correspondent respectivement à 0,6 cm pour l'unité FS1 et 10,5 cm pour l'unité FS2, soit un total de 11,1 cm.

Cette perte de sol (11,1 cm) pour l'ensemble de la séquence sédimentaire est plus faible que celles mentionnées dans la littérature pour d'autre mardelles (Etienne, 2011), où des érosions de 20 à 25 cm ont été enregistrées.

Cette différence peut être liée à plusieurs paramètres :

- les mares étudiées précédemment étaient localisées dans des zones recouvertes de Limon de Plateau (LP) (BRGM, 2001), matériau facilement érodable. Des études sur des systèmes lacustres (Enters *et al.*, 2006 2008) et pédologiques (Houben, 2008), dans ces régions avec des couvertures pédologiques de limons de plateau, révèle d'ailleurs des érosions de 50 à 60 cm

- la plus grande précision offerte par la géophysique pour la mesure des volumes de sédiments accumulés par rapport à l'extrapolation de fouilles archéologiques ou de prospection topographique manuelle

- la délimitation de la taille du bassin versant, basée sur sa forme actuelle qui peut être différente de sa forme passée et donc potentiellement exagérée dans nos calculs

- il est tout à fait envisageable que la durée et le type des anciennes pratiques agricoles aient été différents de celles réalisées sur le bassin versant des autres mardelles sondées, hypothèse qui ne sera vérifiable qu'après la datation de la séquence et l'analyse des données polliniques.

3.1.2.3.7 Conclusion

Le couplage de la géophysique, de la prospection LiDAR et des analyses sur sédiments restitue le plus fidèlement possible la morphologie de la mardelle et de son environnement proche. Grâce à la vision dynamique de la structure qu'elle offre, la modélisation tridimensionnelle permet d'améliorer considérablement la perception des caractéristiques morphologiques et stratigraphiques du réceptacle. Cette approche combinée de différentes méthodes est très rapide à mettre en place et son application à de nouvelles zones humides de Lorraine est d'ores et déjà prévue. Les résultats de Dolving ont montré que la méthode radar-sol, moyennant certaines adaptations aux particularités de la prospection en zone humide marécageuse, est un outil très performant et d'une précision sans égal, pour la reconnaissance des mardelles et d'une manière plus générale pour l'étude de l'histoire des abords immédiats de la structure.

Les protocoles d'exploration développés à l'occasion de ce travail vont permettre d'étudier finement un plus grand nombre de ces structures et nous amener ainsi à réfléchir à de nouvelles problématiques. A partir d'un corpus de sites représentatif de la diversité des conditions stationelles, il serait par exemple intéressant de comparer la morphologie de différents réceptacles choisis en fonction de leur exposition, de leur position topographique, de la nature du substrat, de leur ancienneté, et de la présence ou non de parcellaire reconnu à proximité de ces structures.

3.2 Les recherches sur sol nu

Cet état du sol est à priori le plus adapté à la mise en œuvre conjointe de l'ensemble des méthodes de prospection et ce avec le maximum d'efficacité. C'est-à-dire que la photographie aérienne, la prospection pédestre et la prospection géophysique seront placées dans des conditions idéales pour l'observation des traces de l'occupation ancienne du sol et/ou pour la réalisation de mesures à sa surface.

Dans cette rubrique, nous nous sommes intéressés principalement à l'exploration de quatre « sites » qui présentent des situations très différentes en regard de leur taphonomie*, c'est-à-dire de leurs conditions de fossilisation et de conservation. Il s'agit:

- de l'habitat rural antique des «Bonnots d'Arrues » situé sur la commune de Bourguignon

- du village médiéval fortifié de « Chamabon », situé sur la commune d'Ecurcey

- de l'éperon barré de « Chatillon » situé sur la commune de Roches-les-Blamont et occupé aux périodes pré- et protohistoriques

- du fond de la vallée du Doubs et de sa paléo hydrographie dans un tronçon compris entre les communes de Bourguignon de Mathay

3.2.1 Les Bonnots d'Arrues

Sur la rive gauche du Doubs et à hauteur de la commune de Bourguignon, les sources anciennes (Parent 1953) ou récentes (Aimé, 2002) mentionnent l'existence, sur le plateau du Romont, de plusieurs sites archéologiques d'époques protohistorique (tumulus) et gallo-romaine (villa), localisés notamment dans la combe de Warembourg et sur les hauteurs dominant « la ferme de Warembourg » (fig. 97). Certains de ces sites, « Bois de Mont-Pourron », « Les Arrues », ont fait l'objet d'une reconnaissance spécifique (prospection à vue, ramassage de surface, prospections magnétique et électromagnétique) afin de préciser leur étendue, leur organisation, et éventuellement leur fonction et leur chronologie. Ces résultats ont été exploités en référence aux données fournies par la prospection LiDAR aéroportée et la photo-carto interprétation.

3.2.1.1 L'établissement rural antique des « Bonnots d'Arrues ».

Le site se situe au lieu-dit « Les Bonnots d'Arrues » sur un replat du plateau du Romont à une altitude comprise entre 386 m et 392 m en contrebas des pentes boisées du coteau des « Arrues » qui culmine à 445 m (fig. 78). Au début du siècle, on y aurait mis au jour des traces d'une mosaïque, mais aussi de la poterie sigillée et des objets en bronze, le tout conservé au musée de Montbéliard (Haaz, 2009). En 1998, Gérard Aimé a repéré au même endroit « …*des tuiles en abondance, des traces de mortier, de scories de fer, des fragments de céramique (cruche à anse, céramique fine à couverte noire avec décor à la molette IIIème siècle ?) autour d'un bâtiment sensiblement carré de 18 m de côté environ et aux structures très nettes* ».

Aujourd'hui le site est identifiable en surface sous la forme de deux concentrations de mobilier (terres cuites architecturales, céramiques, pierres) spatialement bien distinctes, elles-mêmes associées à de légères ondulations du terrain très peu visibles sur le modèle LiDAR avec l'application du traitement « Sky View Factor » (fig.98). Ces vestiges se localisent à l'extrémité de deux champs cultivés et au contact d'une grande prairie couvrant plus à l'ouest le flanc de coteau (fig. 99).

A l'automne 2010, deux prospections, électromagnétique et magnétique ainsi qu'un ramassage de surface ont été effectués afin de préciser la nature du contexte géomorphologique du site, le plan des vestiges archéologiques et la chronologie de cette occupation.

3.2.1.1.1 La prospection électromagnétique

La reconnaissance du contexte géomorphologique a été appréhendée à partir d'une prospection électromagnétique réalisée sur une superficie de 3 ha couplée ensuite aux données de la prospection LiDAR. La prospection géophysique, effectuée avec l'appareillage EM-31 de Geonics, visait à cartographier la conductivité électrique du sol dont les variations, mesurées jusqu'à une profondeur de 3 m, reflètent directement les changements affectant la nature et la teneur en eau des matériaux. La prospection a consisté en l'exécution de profils de mesures espacés de 5 m environ et orientés nord-sud, perpendiculairement à la ligne de pente.

La figure 100 représente la carte des pentes dont la maille a été volontairement agrandie afin de limiter le bruit et de faciliter la lecture dans l'environnement immédiat du site. Sur le flanc est du coteau des Arrues, une petite vallée encaissée orientée est-ouest (A) débouche sur une zone beaucoup moins pentue (B) avec un pendage vers l'est compris entre 1 et 4° (fig.101). C'est dans cette zone relativement « plane » que se localisent les concentrations de vestiges archéologiques explorées par la prospection magnétique.

La figure 102 représente la superposition de la carte de la conductivité du sol, avec les valeurs les plus conductrices en bleu et les valeurs les plus résistantes en rouge, sur le modèle ombré de terrain. On remarque que la zone (a), localisée au débouché du vallon, concentre les plus fortes valeurs de conductivité dont l'extension vers l'est et le sud se termine par une limite nette qui correspond à un fort gradient de conductivité (passage de 30 à 17 mS/m). Cette limite, de forme orthogonale, et qui est d'orientation discordante par rapport aux courbes de niveau, pourrait marquer le contact géologique entre les formations calcaires J7a et J7c ou matérialiser dans la pente la trace d'un aménagement anthropique (talus, mur de terrasse ?). Cet aménagement délimiterait alors l'espace à l'intérieur duquel s'accumuleraient préférentiellement les matériaux fins issus de l'érosion et responsables de l'augmentation de la conductivité.

Plus à l'est, aucune corrélation entre les variations de la conductivité et les ondulations du terrain n'est détectée, notamment avec les microreliefs identifiés sur la figure 98 et au sommet desquels affleurent les concentrations de mobilier archéologique repérées en prospection de surface.

3.2.1.1.2 La prospection magnétique

Une surface de près de 1 ha a été prospectée en mesurant les variations du gradient de la composante verticale du champ magnétique terrestre. L'exploration de cette zone s'est déroulée en deux étapes :

- 5 blocs de 40 x 40 m ont été prospectés avec une équidistance d'1 m entre les profils, une résolution d'une mesure tous les 25 cm le long du profil et une hauteur de capteur de 20 cm

- 1 bloc de 40 x 40 m a été prospecté, après visualisation des premières données, avec une équidistance de 50 cm entre les profils, une mesure tous les 50 cm le long du profil et une hauteur de capteur de 40 cm. Cette configuration a été choisie afin de limiter l'influence des matériaux les plus superficiels comme par exemple les amas de tuiles et de matériaux de démolition qui limitaient la visualisation de la géométrie des structures.

Résultats

La figure 103 présente les variations du gradient enregistrées dans la gamme -6/+6 nT/m grâce à la première configuration citée. La carte révèle principalement la présence de deux zones d'anomalies magnétiques distinctes (A) et (B) dont l'agencement ne dessine pas à première vue de forme particulière. L'image montre en fait l'extension des matériaux des couches de démolition de deux bâtiments. Leur localisation coïncide avec deux micro-bombements du relief, visibles sur le modèle ombré du terrain (fig.50), et avec deux concentrations de matériaux visibles à la surface du sol. Une anomalie rectiligne positive (C) formée de deux segments perpendiculaires marque l'emplacement d'une structure fossoyée qui semble relier les deux bâtiments (A) et (B). Plus à l'ouest, dans la prairie, un ensemble d'anomalies positives très localisées pourraient signaler l'existence de fosses et de trous de poteaux (D).

La faible lisibilité des structures nous a incité à modifier les paramètres de l'exploration pour tenter, sur la zone de concentration de mobilier la plus étendue (A), une prospection à résolution spatiale plus fine, avec une maille carrée de mesure et des capteurs de champ rehaussés de 20 cm. Le résultat de cette « prospection test » est présenté fig.104a.

L'image obtenue, extrapolée à partir des données brutes, est en réalité une simulation du champ magnétique à 50 cm de hauteur ; elle révèle, après élimination de la régionale, un bâtiment de forme quadrangulaire mesurant 29 m environ sur ses côtés Est-Ouest et 23 m sur les côtés Nord-Sud, avec des séparations délimitant deux pièces à l'intérieur (fig.104b). Malgré tout, le caractère très peu marqué des anomalies enregistrées par la prospection géophysique et par la prospection LiDAR conduit à penser que les structures enfouies présentent un mauvais état de conservation.

3.2.1.1.3 Le ramassage de surface

Un ramassage de surface effectué en octobre 2010 sur le site a permis d'obtenir des informations chronologiques sur la durée de son occupation à partir de l'analyse du matériel céramique collecté à cette occasion (fig. 105). L'étude céramique détaillée permet de restituer une occupation ininterrompue de ce site de la fin de la Tène D2 jusqu'à la fin du IIIème siècle de notre ère (Lucaselli, 2010).

3.2.1.1.4 Conclusion

En conclusion, l'ensemble de ces résultats complètent les observations déjà réalisées sur ce secteur en confirmant l'existence de vestiges d'au moins deux bâtiments appartenant à une exploitation rurale ayant fonctionné de la fin de la Tène D2 jusqu'à la fin du IIIème siècle. Les bâtiments repérés semblent en mauvais état de conservation, ce qui s'explique par la nature des matériaux utilisés lors de leur construction et par l'érosion dûe aux travaux agricoles.

3.2.2 Châtillon (Roches-les-Blamont)

Localisé sur le territoire de la commune de Roches-les Blamont, le site de cet éperon barré culmine à 530 m d'altitude sur le plateau calcaire du Lomont, au lieu-dit « Châtillon », micro-toponyme réputé indiquer la présence d'ouvrages défensifs (fig. 78). Allongé selon une direction nord-sud, cet éperon digitiforme est défendu au nord par une levée rectiligne et naturellement sur ses flancs ouest et est par des pentes très escarpées dont l'inclinaison excède souvent les 40% dans leur partie supérieure. Une terrasse qui rattache l'éperon au plateau de Roches-les Blamont s'étend en avant de la levée du rempart. La topographie dans la partie nord-est de cette terrasse apparaît relativement bouleversée. Le site est depuis longtemps cultivé en prairie ce qui a entraîné par endroits une érosion quasi complète des sols et l'affleurement par plaques de la roche calcaire (planche photographique, fig. 109).

Ce site a été décrit par Clément Duvernoy en 1875 ; il a noté la présence de mobilier préhistorique (pointes de flèches en silex meulier, fragments de poteries brunes grossières, hache en jade, couteau de jaspe et un morceau de hache polie en aphanite) mais aussi celle d'un fragment de bronze en forme de capsule. Plusieurs études successives consacrées à l'habitat et l'occupation du sol des plateaux du Jura ont permis de décrire plus précisément l'organisation de ce site qui correspond à une enceinte de 25 000 m² bordée d'un rempart légèrement coudé. (Passard, 1980, Passard & Urlacher, 1987 ; Passard *et al*., 1990). Les observations anciennes et les travaux plus récents suggèrent une occupation du site s'étendant de la préhistoire récente (Mésolithique) jusqu'à la Tène avec deux états du rempart respectivement contemporains du Néolithique et de la fin de l'Age du Fer.

3.2.2.1 Résultats de la prospection LiDAR

Sur la représentation Sky View Factor, cet éperon apparaît barré par un talus (rempart) de 160 m de long, 7 m de large et de plus d'1 m de hauteur (fig.106). La levée est constituée de deux segments rectilignes qui forment un angle de 150° et mesurent respectivement 90 m pour le segment ouest et 70 m pour le segment est. Le tracé du segment ouest du rempart s'interrompt avant l'escarpement de l'éperon tandis que celui du segment est rejoint cet escarpement, sous le couvert forestier. L'interruption de la levée du rempart à l'altitude la plus élevée de l'éperon pourrait signaler, sans plus de certitude, un accès antique à la fortification. Des amas de blocs non équarris en bordure de l'escarpement ouest pourraient matérialiser les vestiges d'anciennes structures défensives en pierres sèches (fig.109). La levée relative au rempart délimite un espace d'environ 3 ha (fig. 106) à l'intérieur duquel plusieurs anomalies tumulaires et anomalies linéaires, d'orientation est-ouest et nord-sud, peuvent être clairement identifiées (fig. 106). La comparaison de la scène LiDAR avec l'orthophotographie de 2004 montre que certaines des anomalies tumulaires sont coiffées par des bouquets d'arbres (fig. 106).

Au nord-est et à l'extérieur du rempart, là où la topographie de la terrasse montre un dénivelé de plus de 4 m, apparaissent en élévation plusieurs anomalies du microrelief, qui sont discordantes par rapport au découpage parcellaire du cadastre napoléonien. Leur tracé est souligné par des ruptures de pente bien marquées, elles matérialisent vraisemblablement les traces d'aménagements anciens, (plate formes (PF) et murs ?) en relation avec la défense ou l'accès au camp. Le tracé linéaire d'une de ces anomalies se prolonge plus au sud à l'intérieur du camp en étant recouvert par la levée du rempart, ce qui conduit à penser que ces structures pourraient appartenir à un système de défense de l'éperon plus ancien.

A l'est de l'éperon, le plateau apparait aussi cultivé en pâture, mais le SVF montre clairement la présence d'élévations linéaires attribuables à des murgers. Là aussi, l'effet produit par les murgers à la base des arbres isolés ou des bouquets d'arbres est enregistré (fig. 106) mais toutes les anomalies positives du microrelief ne sont pas à rattacher à la végétation. Ces anomalies ne correspondent ni au découpage parcellaire du cadastre napoléonien ni à celui du cadastre actuel.

A l'intérieur du camp, la représentation cartographique des variations d'altitudes permet de distinguer trois zones:

- au nord, un replat où se développe le talus du rempart forme le point culminant du site ;
- au centre, une zone intermédiaire où se concentrent une grande partie des anomalies tumulaires et linéaires est caractérisée par un profil en pente douce ;
- une zone basse rejoint, par une légère élévation du terrain, l'extrémité sud du promontoire (fig.108).

La confrontation avec le plan cadastral napoléonien de 1836 montre que la zone la plus basse correspond à un groupe de parcelles d'allongement nord-sud, de même orientation que certaines anomalies du micro relief, alors que plus haut dans la pente et sur le replat de l'éperon le découpage parcellaire suit une orientation ouest-est, presque identique à celles des élévations reconnues par le LiDAR dans cette partie du site (fig.106).

3.2.2.2 La prospection magnétique

3.2.2.2.1 Partie Ouest

Dans le but de reconnaître la présence éventuelle de structures archéologiques, associées aux ondulations du terrain, une prospection magnétique basée sur la mesure du gradient vertical du CMT a été réalisée à l'automne 2010 avec le gradiomètre *Grad* 601-2 de *Bartington*. Cette prospection couvre une bande de terrain de 250 m de long par 80 m de large qui s'étend de l'extérieur du rempart jusqu'à l'extrémité sud de l'éperon. Cette bande de 2 ha correspond à l'assemblage de 16 blocs comprenant des modules de 40 x 40 m et de 20 x 20 m. Les mesures ont été acquises à raison de deux mesures par mètre et le long de profils espacés d'1 m, orientés selon une direction approximativement ouest-est. Les capteurs de champ étaient fixés à 40 cm de hauteur par rapport à la surface du sol de

façon à minimiser l'effet dû aux anomalies les plus superficielles dont l'origine pouvait ne pas être nécessairement archéologique.

La carte des variations du gradient vertical du champ magnétique est représentée avec une dynamique du signal de -10/+10 nT/m (fig.110). Sur cette prospection, deux types d'anomalies du gradient magnétique sont principalement détectés : les anomalies positives correspondent à des structures fossoyées (fossés, fosses, trous de poteaux) et les anomalies négatives correspondent aux structures construites en matériau calcaire. Le talus du rempart est identifié sans difficulté sous la forme d'une anomalie magnétique bipolaire qui épouse parfaitement le contour du micro-relief (fig. 111). On identifie également tout un réseau d'anomalies linéaires positives, interprétées, au vu du contexte géomorphologique, comme le remplissage des cassures et des fentes qui affectent le toit de la dalle calcaire. Cette image géophysique de la fracturation du substrat s'apparente d'ailleurs à celle que l'on peut observer sur les sols bruns calciques des plateaux calcaires environnants (fig.112).

D'autres anomalies positives de caractère plus ponctuel pourraient appartenir à des structures fossoyées d'origine archéologique comme le suggère par exemple la disposition de l'ensemble accolé au parement externe du rempart (fig.113) ou bien les alignements de fosses repérés à mi-pente de l'éperon (maison ?), à l'endroit où une anomalie magnétique négative dessine le tracé d'une structure construite correspondant peut-être à un enclos de pierres (fig.113).

Le report sur le carte de prospection de la position des amas de pierres, des affleurements de la dalle calcaire et des élévations ponctuelles du terrain, montre que ces anomalies visibles à la surface du sol ne sont pas associées en profondeur à des anomalies magnétiques de forme clairement identifiable. Cependant un certain nombre des anomalies linéaires détectées sur toute la surface de l'éperon sont orientées parallèlement aux deux segments qui forment le talus du rempart.

3.2.2.2.2 Partie est

Une nouvelle série de prospections a été engagée début 2011, la reconnaissance du site a été étendue à l'extérieur du rempart et au nord est de ce dernier. Parallèlement, un ramassage de mobilier en surface a été effectué durant ces travaux.

Les capteurs on été abaissés à 20 et 120 cm de hauteur afin de limiter les variations du gradient dépendantes de la fissuration du sous-sol. La prospection a consisté en l'exécution de deux blocs mesurant 30 x 30 m et d'un autre bloc de 40 x 40 m. L'écartement entre les profils était d'1 m pour les blocs de 30 x 30 m et de 50 cm pour le bloc de 40 x 40 m.

Les résultats sont présentés figure 114 avec une dynamique de signal allant de -10 à +10 nT/m. La figure 114a présente la zone en général, 114b et 114c correspondent aux deux blocs de 30 x 30 m et 114d et 114e au bloc de 40 x 40 m. On observe peu de structures clairement identifiables à l'exception d'une longue anomalie négative orientée nord-ouest/sud-est (figure 114b) qui pourrait correspondre au tracé d'un ancien chemin et deux autres anomalies négatives linéaires dont l'une forme un angle droit et l'autre correspond à une élévation du relief. Sur la figure 114d, on observe uniquement deux

anomalies négatives linéaires, sans qu'il soit possible de les relier pour le moment aux variations microtopographiques.

3.2.2.3 Ramassage de surface

Malgré des conditions défavorables à l'observation des vestiges en surface, du matériel lithique et du mobilier céramique ont pu être récoltés à l'extérieur et à l'intérieur du camp.

Le matériel lithique a été retrouvé à l'intérieur du camp, dans les taupinières situées au sud du rempart et dans la partie occidentale de la zone intermédiaire de l'éperon (fig. 115) Ce matériel se compose d'un déchet de taille (1) de provenance local mesurant 1,6 x 0,9 cm, d'un éclat (2), de cinq lamelles ou fragments de lame (3 à 7) dont une d'importation (5) (Kimméridgien supérieur), d'un nucléus (8), d'une lamelle retouchée (9) et d'une armature de flèche (10) dont la pointe est brisée. Cet outil est le seul qui puisse être daté avec certitude de la période néolithique.

A l'extérieur du rempart et sur la partie est, des fragments de céramique ont été découverts, les plus caractéristiques sont présentés sur la figure 115. On peut identifier un fragment de gobelet céramique avec des décors guillochés (IIème et/ou IIIème siècle de notre ère) et un morceau de cruche à pâte claire (Ier au IIIème siècle) (n°(11) et (12)).

On signalera qu'aucun matériel de construction (terres cuites architecturales, *tegulae*, *imbrices*,…) n'a été observé en surface, laissant supposer qu'il s'agit de vestiges d'un établissement rural très modeste.

3.2.2.4 Conclusion

En dépit de la difficulté à identifier les anomalies d'origine archéologique parmi les nombreuses anomalies liées à la fracturation du substratum calcaire (cassures, fentes) il a été possible de reconnaître par la prospection magnétique de nouvelles structures, comme celle constituée par exemple par l'alignement de fosses accolées au parement externe du rempart. Les résultats géophysiques ont été beaucoup plus mitigés par contre sur la zone à l'est de l'éperon barré où aucune structure n'a été détectée aux endroits où le matériel archéologique a été collecté.

La prospection LiDAR a donné sa pleine mesure en produisant sur le secteur un relevé très riche de variations microtopographiques dont une partie correspond au découpage du parcellaire ancien du XIXème siècle et l'autre à des structures inédites et sûrement contemporaines de l'occupation du camp.

Grâce aux données du ramassage de surface, il est possible de proposer l'extension de la durée de fréquentation du site et de ses abords immédiats jusqu'à la période du Haut Empire sur la base de l'existence d'un ou de plusieurs habitats ruraux modestes, probablement très mal conservés. Il est toutefois légitime de se demander si les élévations longilignes repérées par la prospection LiDAR, à l'est de l'éperon, ne pourraient pas être mises en relation avec ces probables structures découvertes en prospection pédestre. De plus, l'orientation de ces élévations ne coïncide pas avec celle du parcellaire napoléonien, ce qui amène à penser qu'elles pourraient correspondre à des structures plus anciennes.

3.2.3 Chamabon (Ecurcey)

Le site médiéval de Chamabon culmine à 520 m d'altitude à l'extrémité ouest de la commune d'Ecurcey, près des hameaux de Grattery et des Selliers. Ce site fortifié de hauteur est installé sur un promontoire du plateau calcaire du Lomont dominant le Doubs et son affluent le Roide (fig. 116).

Le nom de Chamabon est attesté aujourd'hui par le lieu-dit « Côte de Champ Babon ». Sur la pointe du promontoire, face à Pont-de-Roide, se remarquent encore les ruines d'une tour maçonnée, construite peut-être dès l'Antiquité, et qui permet d'embrasser toute la vallée du Doubs (Duvernoy, 1875). Cette tour est protégée par des fossés de terre et un talus délimitant dans une demi circonférence en forme de « U évasé » un espace de 2500 m^2. Le dénivelé entre le talus du rempart et le fossé d'enceinte atteint 3 m.

Les sources historiques indiquent que le nom de Chamabon apparaît pour la première fois dans une charte de 1147 confirmant une donation faite à l'abbaye de Belchamp. Une bulle du pape Clément III évoque dès 1189 l'existence d'une grange ecclésiastique à « Champmabon ». Les vestiges d'un ancien château ou d'un ancien habitat fortifié, datant de la période médiévale, sont déjà mentionnés en 1282 dans une charte de donation. Des documents du XVème évoquent encore la « Tour de Chamabon », toujours figurée symboliquement en ruines sur la carte de Cassini (fig. 117). L'édification d'habitations au pied de cette tour durant les XIIème et XVème siècle est certaine comme l'atteste la découverte de fragments de poterie vernissée de cette époque. Une autre preuve de l'occupation du lieu réside dans le dénombrement de la seigneurie de Blamont fourni en 1385 par le sire de Neuchâtel et qui mentionne que Chamabon était alors formé de « *dix maignies d'hommes de franche condition* », soit un hameau peuplé d'environ 40 à 50 personnes.

Les recherches historiques sur l'ancienne seigneurie de Blamont, dépendance du Comté de Montbéliard, précisent que « *le village de Chamabon fut détruit en 1438 par des compagnies de mercenaires, nommées les Ecorcheurs*» (Beurlin 1889). Un traité de 1440 à propos du pâturage commun au finage de Chamabon indique que les rescapés se réfugièrent à Autechaux et Ecurcey après l'anéantissement du village.

3.2.3.1 La prospection magnétique

En 2009, des prospections magnétiques ont été effectuées à l'intérieur mais aussi à l'extérieur de l'enceinte dans le but d'en reconnaitre plus précisément la structuration. Cette enceinte haute d'au moins 2 m nous a obligé à séparer l'exploration du site en deux zones. L'une, à l'intérieur de l'enceinte, d'une surface de 2100 m² est composée d'un bloc de 40 x 40 m, d'un bloc de 20 x 20 m et d'un dernier de 10 x 10 m. La surface prospectée à l'extérieur de l'enceinte mesure 3100 m² ; elle a été divisée en un bloc de 40 x 40 m et 7 blocs de 20 x 20 m. A l'exception des secteurs trop accidentés, toute la surface accessible du site a été prospectée après le nettoyage de la végétation (ronces, herbes hautes)

La carte du gradient magnétique, bien trop bruitée par les anomalies générées par les ferrailles erratiques, n'est pas exploitable. Un champ total à 50 cm de hauteur a été simulé afin de limiter le bruit des ferrailles. Sur la figure 118, on observe peu de structures clairement identifiables. Toutefois,

à l'extérieur de l'enceinte, on remarque une anomalie négative semblant épouser le talus (1) de la fortification, une autre anomalie négative formant un angle droit (2) et deux petites anomalies négatives linéaires. A l'intérieur de l'enceinte, on parvient à distinguer 6 anomalies linéaires négatives (3) dont 5 possèdent la même orientation, la sixième leur étant perpendiculaire.

3.2.3.2 La prospection LiDAR

Par comparaison avec la prospection magnétique, la prospection LiDAR fournit sur ce site de nombreux résultats comme le montre la représentation du modèle numérique de terrain par le SVF. Ce modèle documente de façon très détaillée le plan de la maison forte et ses abords immédiats (fig. 119).

Sur cette figure, le talus de l'enceinte de la fortification se distingue très nettement, tout comme le fossé qui la borde à l'extérieur. Au-delà du point de franchissement actuel de l'enceinte (1), le talus se prolonge, sous le couvert forestier jusqu'en bordure de l'escarpement. Au sud de l'enceinte, sur une longueur d'une quarantaine de mètres, des élévations perpendiculaires marquent les vestiges d'un ou de plusieurs bâtiments de l'ancien village médiéval (2). Ces structures se distribuent autour d'une source (S) et d'une conduite d'eau aménagée (parements et couverture en pierres).

Le modèle numérique de terrain, permet par ailleurs de reconnaitre un deuxième talus, seulement marqué par une légère élévation (3) et dont le tracé court parallèlement à l'extérieur du précédent. Une partie de ce talus était d'ailleurs visible sur la prospection magnétique (1 fig. 118). On peut suivre le tracé de cette seconde enceinte jusqu'à une inflexion (4), où une petite avancée de forme circulaire pourrait signaler l'emplacement d'une petite tour d'angle. Au-delà de ce point, l'élévation trahissant l'enceinte n'est plus visible. On observe d'autres petites élévations sans qu'il soit pour le moment possible de les relier à une quelconque structure (5) et (6).

En contrebas de la fortification, le long de l'escarpement de la falaise, une sorte de replat de 30 m, allongé dans le sens nord-sud semble avoir été aménagé (7). A l'intérieur de l'enceinte, une petite élévation ponctuelle correspondant à une anomalie magnétique négative (8) pourrait être interprétée comme le soubassement d'une tour. Plus au nord, le modèle numérique montre clairement les murs encore conservés en élévation de la tour rectangulaire ainsi que l'emprise de la plate forme fortifiée sur laquelle elle a été édifiée (9).

3.2.3.3 Conclusion

Les informations fournies par les prospections géophysiques se révèlent d'un intérêt assez limité en raison de la pollution métallique du site et de son relief très accidenté. Par contre, les données microtopographiques ont permis d'identifier de nombreuses structures inédites complétant notre connaissance initiale sur l'organisation du site. On mentionnera pour mémoire, la découverte d'une deuxième enceinte, des constructions en périphérie sud de la fortification, d'une plateforme protégeant la tour principale et d'un aménagement de l'escarpement de la falaise. En revanche, aucune indication ne permet pour l'instant de localiser la porte d'accès à la fortification.

3.2.4 La plaine alluviale

Depuis quelques années a été engagée, dans le cadre du PCR Mandeure, une reconnaissance cartographique des formations alluviales quaternaires et des réseaux hydrographiques dans un tronçon élargi de plaine alluviale du Doubs. Cette reconnaissance combine la photo interprétation et les prospections géophysiques (Bossuet *et al.*, 2001-2005 ; Bossuet & Thivet 2006-2007). En Grande Bretagne, les exemples récents d'application de la méthode LiDAR à la détection des paléo formes fluviales ont clairement montré que le relevé microtopographique des ondulations du sol est un moyen parfaitement adapté à la mise en évidence des traces laissées dans le paysage par les cours anciens des fleuves et des rivières (Howard *et al.*, 2008) et ce au même titre que les prospections aériennes et les prospections géophysiques. Nous avons donc souhaité comparer, sur une zone commune et relativement restreinte, les résultats obtenus par une orthophotographie, un TPI (Topographic Position Index) et une prospection électromagnétique mesurant la conductivité électrique du sol.

3.2.4.1 Zone d'étude

La zone étudiée correspond à un tronçon de la vallée du Doubs situé en amont de Mandeure, entre Mathay et Bourguignon (fig. 120). La comparaison entre méthodes s'est effectuée à l'échelle d'une portion de la vallée d'1,5 km de longueur et 1 km de largeur, englobant l'extension des terrasses alluviales Fy et Fz.

Les prospections électromagnétiques se sont déroulées du 12 au 13 Avril 2010 sur une superficie de 48 ha. Le TPI utilisé est issu de la prospection LiDAR d'Avril 2009. Pour alléger le calcul, le TPI a été créé à partir d'un MNT doté d'une résolution d'1 m. L'orthophotographie utilisée, d'une résolution de 25 cm, est issue de la prospection LiDAR de 2009.

3.2.4.2 Résultats de la prospection électromagnétique

La mesure de la conductivité du proche sous-sol avec l'appareillage l'EM31 devait nous permettre de différencier le comblement des paléochenaux, constitués de limons fins, gorgés d'eau et donc plutôt conducteurs, des terrasses alluviales, formées principalement de dépôts sablo-graveleux et électriquement plus résistantes (données du sondage 04748X0080/P1 à P6, BSS-BRGM, date inconnue).

La figure 121 représente la cartographie des variations de la conductivité pour une profondeur d'investigation du sol d'environ 3 m et le schéma d'interprétation. Deux zones géographiques bien distinctes associées à deux variations régionales de la conductivité sont identifiées : l'une comprise entre 10 et 15 mS/m (tons rouges), qui marque l'extension de la terrasse Fy et l'autre comprise entre 20 et 30 mS/m (tons bleus et verts) qui correspond à l'emprise de la terrasse Fz. La transition entre ces deux terrasses est observable au niveau du point noté (1) où l'on passe de valeurs d'environ 25 mS/m à 12 mS/m. La transition s'opère à l'endroit d'une pente qui peut être observée aisément sur le terrain mais aussi sur le modèle ombré du terrain. Cette différence de valeur de conductivité est principalement due à la profondeur de la nappe, la différence sédimentaire entre les deux terrasses

étant assez peu marquée comme le montre l'ancien forage du BRGM implanté à l'emplacement de la sablière (Bossuet *et al.*, 2001, 2002).

Au sein des deux terrasses Fy et Fz, les traces d'incisions de plusieurs paléochenaux apparaissent parfaitement individualisées sous la forme d'anomalies plus conductrices.

Dans la zone prospectée au pied du versant ouest de la vallée, des traces d'incisions, orientées grossièrement OSO/ENE, ont été détectées dans les labours en (2) et (3). Ces incisions sont recoupées par deux doublets de fossés rectilignes et parallèles (4) et (5), distants d'une trentaine de mètres chacun et de direction nord-sud. Le tracé du double fossé le plus occidental (5), bordé par endroits de bassins, a été repéré sur plusieurs centaines de mètres de longueur dans la plaine en amont et jusqu'au quartier artisanal Antique de l'« Essarté » dans la plaine en aval. Ces traces d'aménagements, également visibles sur les images Google Earth de 2007 (fig. 121b) sont de toute évidence en rapport avec l'hydraulique ; elles ont été interprétées comme un dispositif à double fonction : distribution « régulée » de l'eau par le fossé interne et les bassins de rétention ainsi que l'assainissement d'une partie de la plaine par le fossé externe drainant le pied de versant (Bossuet *et al.*, 2009). Ce dispositif, reconnu ponctuellement à différents endroits de la vallée du Doubs (Gaston, 2008) attesterait d'une volonté de gérer, dès l'époque antique, les contraintes du milieu à large échelle.

Plus au sud et au débouché d'une petite combe du plateau du Romont, on peut observer un autre groupe de traces conductrices (6 fig. 121a) d'orientation SO/NE.

Dans la deuxième zone prospectée, cultivée en pâture, plusieurs traces d'incisions d'anciens chenaux se dessinent également. Par ailleurs, trois traces de chenaux (7) (8) et (9) convergent vers une anomalie conductrice (10) plus étendue. Plus à l'ouest de cette anomalie, on devine le tracé de deux chenaux (11 et 12) de plus petite dimension et de direction d'écoulement sud-nord.

Sur la terrasse Fz et en rive gauche du Doubs, la carte géophysique montre le tracé d'un petit chenal qui serpente sur 200 m selon une direction SSE/NNO avant de buter sur la terrasse Fy et d'infléchir son cours vers le nord-est (13). En rive droite, d'autres anciens chenaux (14) courant selon des directions sud nord sont identifiables à l'intérieur d'un méandre de la rivière. Au pied du versant est de la vallée, une zone de forte conductivité (15) marque le tracé d'un canal d'alimentation d'un système de bassins.

Sur l'image géophysique, l'intrication des traces laissées par les anciens chenaux confirment l'existence dans ce secteur de plusieurs réseaux hydrographiques, de style et d'époques différentes.

3.2.4.3 Résultats de la prospection aérienne

L'orthophotographie du mois d'Avril 2009 révèle, à partir des contrastes de végétation et d'humidité bien marqués à cette période de l'année, une partie seulement des chenaux cartographiés par la géophysique (fig.122).

Les deux ensembles de double fossé ne sont pas visibles de même que la limite entre les formations alluviales Fy et Fz. La grande zone conductrice (10) n'apparaît pas non plus sur ce cliché ; elle

correspond en effet à une zone peuplée d'arbres où il a été cependant possible de faire des mesures géophysiques. L'orthophotographie permet par contre de prolonger vers le nord les traces convergentes de deux chenaux (16) qui, au-delà de la zone prospectée, ne forment plus qu'un seul chenal à hauteur de la sablière. Aucune trace d'incision n'est par contre observable plus à l'est sur la terrasse Fz.

3.2.4.4 Résultats de la prospection LiDAR

La présence des chenaux fossiles se manifeste par de petites dépressions linéaires et curvilignes sur le modèle numérique de terrain. Sur la figure 123, le TPI a été représenté avec une dynamique du signal variant entre -10 et +10 cm. Sur ce modèle, les anciens chenaux apparaissent avec une teinte plus sombre que celle de l'encaissant.

La limite (1) entre la terrasse Fy et Fz se voit parfaitement bien sur le modèle et se marque sur le terrain par une brusque élévation. Au nord de la prospection, aucun des paléochenaux détectés par la géophysique n'est visible ce qui peut s'expliquer par l'arasement provoqué par les labours. Le tracé des chenaux reconnus en (6) est nettement identifiable dans toute sa continuité, de même que les multiples divagations apparues en (16) et (7), (8) et (9). Toutefois ces trois derniers sont moins bien visibles que sur l'orthophotographie. Plus au sud, le chenal (13) se distingue plus difficilement et, une fois encore, aucune trace de chenalisation n'apparaît en rive droite du Doubs.

3.2.4.5 Conclusion

La comparaison entre les trois approches montre que les résultats les plus exhaustifs sont fournis par la prospection électromagnétique. Grâce à cette méthode, nous avons pu cartographier l'empreinte de quatorze chenaux ou groupes de chenaux sur la totalité de la zone alors que l'orthophotographie et LiDAR ne décèlent respectivement que neuf et six chenaux. Toutefois la prospection est bien évidemment plus « chronophage » et dépendante de la maîtrise foncière et de l'accessibilité aux terrains (clôtures, cultures etc.). Cependant, cette appréciation doit être aussi nuancée par le fait que nous n'avons utilisé qu'une seule mission de reconnaissance et l'on imagine aisément que nous aurions pu obtenir une cartographie beaucoup plus complète des anciens chenaux en dépouillant d'autres clichés. L'un des intérêts majeur de la photo-interprétation, est d'offrir, contrairement aux deux autres méthodes de prospection, la possibilité d'accéder aussi à des états anciens du paysage et d'en visualiser les formes anciennes (parcellaires, fluviales…) aujourd'hui disparues. Le cliché de la mission IGN de 1951 en donne un parfait exemple en révélant le réseau hydrographique ancien fossilisé à l'emplacement de la sablière (fig. 124).

Les données microtopographiques acquises par la prospection LiDAR peuvent apparaître comme les moins informatives. Toutefois, et au contraire des deux autres méthodes, elle est capable, dans ce domaine de l'hydrographie, de détecter des structures inédites sous couvert boisé comme le révèle un extrait de la scène LiDAR (fig. 125), prise juste au nord de Mandeure.

3.3 Les recherches en milieu urbain ou péri-urbain

Les vestiges de l'agglomération antique d'*Epomanduodurum* s'étendent sur plusieurs centaines d'hectares, de part et d'autre du Doubs, sous les constructions modernes des villes de Mandeure et de Mathay mais également à leur périphérie, dans de vastes espaces accessibles aux méthodes extensives de prospection.

Pour confronter les différentes méthodes à l'échelle du site archéologique nous avons choisi sept zones de prospection (fig. 126) considérées comme représentatives de l'implantation de la ville antique et de ses principaux édifices. Il s'agit :

- des quartiers artisanaux de « l'Essarté » et de « Faubourg-de-Pont », en rive gauche du Doubs

- des quartiers d'habitation des « Combolles », en rive gauche du Doubs et de ceux des « Combottes » et de « Champ Pelletier » en rive droite

- d'une possible annexe des thermes de « Murraillebourg » au lieu-dit « les Grillottes »

- du complexe monumental du théâtre et du plateau qui le surplombe.

3.3.1 Le quartier artisanal de « l'Essarté » (Mathay)

3.3.1.1 Localisation géographique et historique des recherches

C'est entre 1985 et 1992 qu'un vaste quartier artisanal antique a été découvert à l'«Essarté» par des fouilles préalables à la construction d'un complexe sportif et d'un lotissement. Seuls 3,5 ha avaient pu être fouillés dans des conditions d'observation très inégales, du simple relevé de structures pendant le creusement d'une étroite tranchée de voirie à la fouille en aire ouverte de plus de deux hectares d'un seul tenant planifiée sur plusieurs années (Cantrelle, 1989, 1990 ; Delor, 1988 ; Humbert, Llopis, 1990 ; Llopis, 1985, 1986, 1987, 1988[a] ; Mazimann & Mougin, 1995 ; Petit, 1986 ; Vaxelaire, 1989). Les prospections aériennes avaient permis d'estimer l'étendue totale du quartier à une vingtaine d'hectares (Augé, 1990).

Les fouilles avaient mis en évidence un quartier artisanal antique aux vestiges en élévation mal conservés. Les prospections aériennes avaient révélé les traces de nombreuses structures en creux probablement en liaison avec le quartier antique et s'étendant bien au-delà de la zone fouillée, ainsi que dans la partie orientale de l'Essarté, plusieurs enclos circulaires évoquant une nécropole plus ancienne.

La zone d'étude de l'« Essarté »se situe dans la plaine du Doubs, (fig. 127) à environ 2 km en amont du cœur de l'agglomération antique. La partie fouillée du quartier artisanal antique est occupée aujourd'hui par un complexe sportif bordé à l'est et à l'ouest par deux zones ouvertes où se prolongent les vestiges. L'extension de la reconnaissance du quartier antique est limitée au sud par des zones pavillonnaires.

3.3.1.2 Les investigations anciennes (1985-1992)

Les fouilles ont permis d'interpréter les vestiges de l'Essarté comme ceux d'un quartier artisanal spécialisé dans la production de céramique commune (surtout des cruches à pâte claire de tailles et formes diverses), comprenant une quinzaine de fours qui appartiennent à au moins sept ateliers répartis sur l'ensemble de la zone dégagée. Deux structures interprétées comme des fumoirs à viande ou des séchoirs ont également été découvertes.

D'une manière générale, toutes les structures excavées mises au jour étaient bien conservées (fours, silos, fosses, caves) contrairement au bâti en élévation et aux niveaux de sols, souvent très endommagés voire totalement détruits.

Le quartier antique est structuré par de larges rues formant des mailles rectangulaires dans lesquelles s'inscrivent des bâtiments aux épais murs de façade (rues 1, 2, 4, 7 sur la figure 128). Ces rues desservent plusieurs voies secondaires plus étroites (rues 3, 5, 8). A la fouille, une grande zone est apparue vide de toute construction (fig. 128, zone appelée « secteur 4 »). Il n'est pas exclu que ce vide puisse résulter d'une destruction complète et ancienne de cette partie du quartier antique : les comptes rendus de fouille rapportent le piètre état de conservation des structures archéologiques excavées conservées dans cette zone (fours, silos, fosses) et indiquent par ailleurs qu'il n'a pas été possible de confirmer ou d'infirmer l'existence de murs ou de bâtiments, malgré plusieurs sondages (Llopis, 1988[b]; Cantrelle, 1989, 1990).

Etant donné le mobilier découvert, l'endroit a pu être occupé au moins partiellement dès la première moitié du Ier siècle de notre ère. Le quartier est vraisemblablement en place dès le dernier quart du Ier siècle. L'ensemble du quartier est manifestement occupé pendant tout le IIème siècle et au début du IIIème et plusieurs ateliers de potiers ont dû fonctionner à ce moment-là.

On ignore quand le quartier a été démantelé, mais sa destruction a pu intervenir dès l'Antiquité tardive : certains démontages de murs, fondations comprises, sont précoces et pourraient remonter au IVème siècle (Llopis, 1985b).

En fonction des connaissances déjà acquises, la production céramique telle qu'on la perçoit sur l'agglomération antique de Mandeure-Mathay (des ateliers de potiers fabriquant également de la céramique commune aux mêmes périodes que celles mises en évidence pour l'Essarté sont attestés dans d'autres secteurs de la ville) correspond à une fabrication de petite envergure de vaisselle courante, destinée à des besoins locaux. Mais on est loin d'avoir fouillé les zones artisanales de Mandeure-Mathay de façon exhaustive et les estimations qui ont été faites, notamment sur l'étendue et l'importance des ateliers de potier, sont à considérer en fonction de ces limites.

3.3.1.4 La prospection pédestre

Dans le but de préciser l'extension des vestiges archéologiques, des prospections à vue ont été menées entre 2006 et 2009 dans la zone ouest du quartier de l'Essarté, entièrement occupée par des champs ouverts cultivés (Nouvel, 2006, 2009). Ces prospections visaient principalement à identifier

à la surface du sol des matériaux de construction et/ou du mobilier, en relation avec la présence des structures enfouies.

Les espaces disponibles pour la prospection ont été arbitrairement divisés en surfaces similaires (de 1 à 3 ha en moyenne). Les zones ainsi délimitées pouvaient regrouper plusieurs parcelles cadastrales. Les prospections ont consisté en un ramassage systématique avec un passage tous les 10 m.

Les résultats des prospections sont présentés sur la figure 129. La répartition au sol des matériaux de construction antique est hétérogène : les zones C sont vides de tout matériel de construction ou de mobilier, la zone B (en jaune) représente une zone de faible concentration (de mobilier) qui correspond à un épandage de mobilier antique et les zones notées A1 à A7 comportent une forte concentration de matériaux de construction antiques. Les zones de concentration de fragments de parois de four et de scories sont reportées respectivement en noir et en bleu sur la figure 129. Elles se distribuent majoritairement dans les zones de concentration de matériaux de construction antiques.

3.3.1.5 La photo-interprétation

Nous avons utilisé quelques-unes des nombreuses photographies aériennes obliques à basse altitude prises par Patrick Augé à la fin des années 1980 (Augé, 1990) ainsi que les orthophotographies acquises en 2009 dans le cadre du projet LIEPPEC.

Le secteur est situé sur une terrasse alluviale Fy qui est constituée de galets et de graviers presque exclusivement calcaires (BRGM, 1973). La plupart des anomalies phytographiques matérialisent des structures excavées (fosses, fossés, silos, caves) creusées dans les graviers du Doubs. Elles apparaissent avec une couleur plus foncée sur les clichés pris en juin 1989).

Les prises de vues obliques révèlent de nombreuses traces de structures excavées situées à l'est et à l'ouest de la zone fouillée. Une grande partie de ces traces correspond à des fours, à des silos, à des fosses et à des fossés rectilignes ou circulaires. Ces structures n'ont jamais été géoréférencées précisément à cause du trop faible nombre de repères identifiables aujourd'hui.

À l'est du complexe sportif (fig. 130b), on peut observer une zone où se concentre une importante densité de structures en creux aisément repérables grâce aux anomalies marquées qu'elles génèrent dans la végétation (A) ; de taille et de forme variables, ces structures, situées de part et d'autre d'une anomalie linéaire L1, ne montrent pas d'agencement particulier. À l'extérieur de cette zone, on identifie clairement des anomalies caractéristiques de fossés, (1) et (2), correspondant respectivement à un double enclos circulaire et à un enclos circulaire simple.

Dans la partie ouest du quartier artisanal (fig. 130.a), on observe également l'existence de traces correspondant à des structures excavées (fosses, fossés), mais en quantité moindre que dans la partie est (figure 130.b), ainsi qu'une longue structure curviligne (1, fig. 130.a). Des structures rectilignes parallèles (2, 3, 4, 5, fig. 130.a) semblent suivre des orientations analogues à celles des axes viaires reconnus par la fouille (cf. fig. 128).

3.3.1.6 La prospection magnétique et la prospection LiDAR

Une prospection d'environ 7 ha, de part et d'autre des installations sportives a été effectuée. Les profils étaient espacés de 1 m avec une mesure tous les 25 cm de long des profils.

Les résultats de ces prospections sont présentés par zones, respectivement situées à l'est et à l'ouest du quartier artisanal.

3.3.1.6.1 Zone est du quartier artisanal

Toute la surface accessible a été prospectée à partir d'un découpage en douze blocs et des profils de mesure orientés est-ouest ; trois blocs aux profils orientés nord-sud nous ont permis de faire les raccords le long de la clôture située à l'est de la prospection.

Les résultats sont présentés sur la figure 131 avec une dynamique du signal comprise entre -5 à +5 nT. La figure 131a présente la carte de prospection et son interprétation et la figure 131b montre les données brutes tout en proposant une délimitation de l'espace prospecté en trois zones (zones 1, 2 et 3). La cartographie des variations du gradient magnétique montre des anomalies bipolaires ainsi que des anomalies positives ou négatives.

Résultats de la prospection

La zone 1 sur la figure 131b correspond à une zone à forte concentration d'anomalies bipolaires. Au vu des modèles inversés de la forme et de l'intensité de ces anomalies, nous pouvons dire qu'elles sont sûrement dues à la présence de masses métalliques (piquets) implantées pratiquement à la verticale dans le sol (Stocco *et al.*, 2009). Les photographies aériennes de la zone ne montrent d'ailleurs pas d'anomalies phytographiques à cet endroit. Aucune structure archéologique n'a donc pu être mise en évidence dans cette zone où les restes probables d'une clôture enfouie provoque une réponse magnétique si forte que la présence d'autres aménagements est impossible à détecter à cet endroit.

La zone 2 sur la figure 131b correspond à une association d'anomalies positives et d'anomalies bipolaires. Si l'on se réfère aux résultats des fouilles entreprises juste à l'ouest, nous pouvons en déduire la présence conjointe de structures fossoyées et de structures de combustion. La structure F1 (fig. 131a), sorte de grande fosse rectangulaire mesurant 4,7 m sur 6 m est entourée d'une faible anomalie négative rectiligne, signe de la présence d'un mur en pierres.

La zone 3 (fig. 131b) correspond à une zone caractérisée par une plus faible densité de structures fossoyées et une absence de structures de combustion analogues à celles de la zone 2.

On perçoit également un système de voies (rues) (V1, V2, V3, fig. 131a) qui suit des orientations identiques à celles qui structurent plus à l'ouest le quartier artisanal ; les voies V1 et V2 notamment matérialisent le prolongement d'axes de circulation repérés lors de la fouille. On remarque également que de nombreuses petites structures fossoyées sont alignées le long de l'axe V2.

D'autre part, trois anomalies caractéristiques de fossés circulaires (E1, E2, E3, fig. 131a), que l'on pourrait attribuer d'après les critères typologiques à des enclos funéraires de l'Âge du Bronze (Delor & Rolley, 1995) sont clairement visibles. Les enclos E2 et E3 sont des enclos simples, respectivement d'un diamètre de 22 m et de 17 m. L'enclos E1 est constitué d'un double fossé dont les diamètres mesurent 19 et 22 m.

On observe également trois structures quadrangulaires fossoyées, Q1 à Q3 pouvant correspondre à des enclos laténiens (Delor & Rolley, 1995). À l'intérieur de Q2, de petites anomalies fossoyées sont situées aux angles des structures, matérialisant peut-être la trace de trous de poteaux. Les anomalies fossoyées situées à l'extérieur des enclos peuvent s'expliquer de deux façons : elles pourraient être en relation avec les activités artisanales, comme le suggère la proximité des vestiges vus en fouille. Toutefois, on ne détecte aucune anomalie bipolaire caractéristique de structures de combustion (fours, foyers) dans cette zone. Ces anomalies fossoyées pourraient plutôt marquer l'emplacement d'inhumations sans enclos implantées à l'extérieur des structures quadrangulaires. On pourrait proposer la même interprétation pour les anomalies fossoyées reconnues à l'extérieur des enclos circulaires.

Les anomalies linéaires G1, G2, G3 sont d'interprétation plus difficile, faute de pouvoir établir un lien avec les structures archéologiques environnantes connues. Ces anomalies positives mettent en évidence des aménagements fossoyés comblés. G1 tout d'abord correspond à une limite parcellaire actuelle mais aussi à une limite sur l'ancien cadastre de 1836 dont on sait que le découpage parcellaire a pérennisé les axes structurants du quartier artisanal (Thivet *et al.*, 2009). G2 et G3 présentent chacune un angle droit, cependant leur interprétation reste compliquée. Ces anomalies semblent recouper l'enclos E2, mais peuvent difficilement être mises en relation avec les structures environnantes.

Si l'on compare les anomalies géophysiques au modèle de terrain ombré obtenu par prospection LiDAR (fig. 132), on constate que les voies V1 et V2 sont les seules anomalies identifiables à la fois sur la carte de prospection magnétique et sur le modèle ombré de terrain qui n'apporte finalement que peu d'informations. A noter la dépression linéaire notée 1, visible sur la prospection LiDAR, mais invisible sur les prospections magnétiques du fait de la grande pollution métallique dans la zone traversée (fig. 131b, zone 1).

3.3.1.6.2 Zone ouest du quartier artisanal

Cette zone d'une superficie de 4,2 ha s'étend depuis l'ouest du complexe sportif de l'Essarté jusqu'au pied du versant ouest de la vallée. Cet espace est actuellement cultivé en champ ouvert, alternant chaume, prairie et labour ; il est bordé au sud par les lotissements d'une zone pavillonnaire.

Cette prospection a été faite en 26 blocs de 40 x 40 m avec des profils orientés est-ouest.

Les résultats, présentés figure 133 avec une dynamique du signal variant de -5 à +5 nT/m, mettent en évidence des anomalies bipolaires, positives et négatives du gradient magnétique. La figure 133a montre la carte de prospection avec interprétations et la figure 133b présente les données brutes avec la délimitation d'une zone spécifique.

Résultats de la prospection

La zone 1 sur la figure 133b se caractérise par une plus grande densité d'anomalies. Sur la figure 133a, on peut identifier une trentaine d'anomalies du gradient positif, trois anomalies négatives, cinq anomalies linéaires et quelques anomalies bipolaires. Les effets induits par les pylônes de la ligne électrique, les piquets et les clôtures métalliques ont été atténués au moyen de filtrages appropriés.

Les anomalies notées V1 à V4 sur la figure 133a prolongent l'orientation des axes de circulation relevés en fouille. Au sud-est de la prospection un fossé repéré en prospection aérienne a pu être recalé (F1).

Les anomalies négatives du gradient magnétique (1, 2, 3 fig. 133a) peuvent être interprétées comme des restes de maçonnerie.

L'anomalie magnétique F2 est elle aussi visible sur le modèle de terrain ombré obtenu grâce à la prospection LiDAR (fig. 133). Elle doit correspondre à un fossé comblé et plus précisément au canal des Avets, dont il est fait mention dans les sources manuscrites du XIXème siècle. « *C'est en 1818 et le 3 février1842 que le conseil municipal aborde la question d'un canal d'assainissement pour les terrains situés sous la Roche, qui sont inondés par les eaux de ruissellement de la colline. De 1855 à 1857, le creusement du canal depuis la gare, au lieu-dit « Sous Romont », passant sous la rue de la Gare, le chemin départemental 438, la rue de la Roche, la rue de Valentigney, la rue du Pont, jusqu'au Doubs, a été effectué à la main pour assainir les terrains* » (Emonnot, à paraître).

L'anomalie liée au canal des Avets est la seule qui soit parfaitement révélée par le modèle ombré de terrain obtenu via le LiDAR. Les autres anomalies repérées sont identifiables sur le plan cadastral napoléonien.

Si les anomalies A1 à A3 correspondent indubitablement à des zones de combustion, l'anomalie A2 est particulièrement remarquable en raison de sa taille et surtout par l'observation que nous avons pu en faire sur le terrain : elle est en effet associée en surface à une zone de concentration de tuiles antiques de 10 x 15 m, laissant supposer l'existence d'un four de tuilier et de ratés de cuisson. Les anomalies positives semblent avoir, quant à elles, une orientation préférentielle (nord/sud) en 1A.

3.3.1.7 Conclusion

L'information apportée par les prospections géophysiques a permis d'effectuer un travail de synthèse et d'interprétation des données anciennes (fouilles, prospections aériennes et pédestres), beaucoup plus complet que ce qui avait été réalisé auparavant (fig. 134) : l'extension du quartier artisanal antique de part et d'autre du stade, entrevue par la prospection aérienne, a bien été confirmée par la prospection magnétique avec la découverte de structures en relation directe avec les activités d'artisanat (fours, foyers, etc.) ou avec le réseau viaire structurant l'organisation du quartier. Les anomalies phytographiques observables sur les photographies des années 1980-90 ont pu être replacées avec une bien meilleure précision, grâce au couplage entre la prospection géophysique et le relevé des points d'implantation des carroyages réalisé avec un GPS à post correction différentielle.

De plus, la nature de ces anomalies a pu être interprétée en différenciant celles liées à des structures de combustion de celles liées à des structures fossoyées simples. Les prospections ont ainsi révélé une vraie dissymétrie dans l'organisation du quartier. La partie ouest s'avère nettement moins riche en fosses et surtout en structures de combustion que la partie est, ce qui reflète une activité de production céramique préférentiellement implantée dans la partie est du quartier antique. Globalement, plus d'une vingtaine de structures assimilables à des fours ont été mises en évidence par les prospections magnétiques, ce qui amène à réviser à la hausse l'importance de la production céramique du quartier de l'Essarté ; on dénombre à présent un potentiel de 35 fours contre 15 connus auparavant, on peut supposer également une plus grande variété des produits fabriqués, avec une probable production de tuiles.

Les données relatives à la voirie sont partiellement confirmées par la prospection LiDAR. Celle-ci a apporté peu d'information sur la structuration du quartier antique de l'Essarté. Ceci s'explique par le fort arasement des vestiges archéologiques, qui a d'ailleurs été constaté au cours des fouilles des années 1980-90. Des pratiques agricoles intensives ont érodé année après année les microreliefs du terrain susceptibles de signaler en surface la présence des structures archéologiques enfouies. Grâce aux prospections géophysiques et à la synthèse des données de prospection, on peut cerner plusieurs types d'occupation du même espace au cours du temps.

Les prospections magnétiques ont permis de découvrir un nouvel enclos funéraire circulaire (E3 fig. 131a) s'ajoutant aux deux autres détectés en prospection aérienne, ainsi que trois enclos rectangulaires vraisemblablement laténiens (Q1, Q2, Q3). En référence aux critères typologiques définissant la chronologie des enclos funéraires (Delor & Rolley, 1995), on peut affirmer que cet espace a eu une fonction de nécropole, dont l'extension exacte n'est pas connue, entre l'Age du Bronze et la période laténienne. Cette fonction serait-elle à rapprocher de la nécropole laténienne fouillée à environ 500 m au sud de l'Essarté dans les années 1990 au lieu-dit « les Longues Raies » (Barral, 1996) ? A une échelle plus large que celle du simple quartier de l'Essarté, ce secteur au sud de Mathay se distingue donc par la présence d'une ou de plusieurs zones d'inhumations, ce qui pose la question de la nature de l'occupation de ce secteur de la plaine du Doubs au cours de la protohistoire.

3.3.2. Faubourg de Pont (Mathay)

3.3.2.1 Aperçu de la recherche

Les premières fouilles sur ce complexe artisanal antique situé rive gauche du Doubs datent de la fin du XIXème siècle et sont entreprises par Lalance et l'Epée (Lalance, 1897). Les vestiges du quartier artisanal sont matérialisés sur un plan de 1852 par la disposition singulière des nombreux tas d'épierrement (murgers) encore visibles dans cette zone, orientés parallèlement ou perpendiculairement à un axe structurant le paysage et dont l'appellation microtoponymique est « Vie du Milieu ». Cette voie principale autour de laquelle se structure ce quartier artisanal a été reconnue en prospection aérienne, depuis la combe qu'elle emprunte pour sortir de la vallée jusqu'à la rive gauche du Doubs où son tracé aboutit à hauteur d'un gué*. Plusieurs sondages de diagnostic archéologique réalisés

dans ce secteur ont permis de reconnaître la structure de la voie et celle des vestiges qui lui sont associés. (Mougin *et al.*, 1997, 2002).

3.3.2.2 La prospection électrique

Une cartographie de la résistivité à une profondeur de 1 m a été réalisée sur une superficie d'environ 3,5 ha (fig. 135).

Elle montre que les vestiges construits (murs) des installations artisanales et de l'habitat se distribuent de part et d'autre d'une large voie V1 qui apparaît comme étant l'élément structurant tout le quartier. La chaussée de cette voie d'orientation NO/SE est détectée sous la forme d'une anomalie de 6,75 m de large, parfaitement rectiligne et électriquement très résistante. Les façades des bâtiments sont espacées de 20 m d'un bord à l'autre de la voie.

A son extrémité nord-ouest, la voie forme une patte d'oie et se sépare en deux tronçons. La voie la plus large bifurque vers l'ouest à travers une combe qui débouche au sommet du plateau. L'autre tronçon de voie, moins large, se développe en direction du nord-ouest. C'est au niveau de la patte d'oie que furent découvertes deux bornes miliaires* érigées l'une à côté de l'autre, formant un groupe (Jeannin, 1986). La première *(C.I.L.* XIII 9079), d'un diamètre de 0,60 m, datant de l'empereur Trajan et conservée au musée de Besançon a été dégagée en 1894 et son socle est aujourd'hui perdu. Le socle du second milliaire *(C.I.L.* XIII 9080), découvert à Mathay dans les années 1895-96, a été érigé au début du I^{er} siècle, sous le règne d'Hadrien (117-138) et a été vendu en 1897 au musée de Montbéliard.

Une série de sondages réalisés lors du projet du « shunt de Mathay » a permis de recouper la voie sur toute sa largeur (fig. 136). Sept niveaux de chaussée ont été identifiés sur une coupe stratigraphique effectuée sur le prolongement de son tracé au nord.

En dehors de cet axe principal, on repère la voie V4, située à l'ouest de la voie V1, de largeur moins importante que cette dernière. Elle longe le lotissement des « Avets » suivant une direction parallèle à V1. Des fouilles menées par J-P Urlacher ont montré que ce quartier se prolongeait jusque dans le lotissement (Jacob, 1984) mais sans qu'il puisse en cartographier précisément l'extension. Au nord de la prospection, une voie (V5), d'orientation SO/NE et perpendiculaire à celle des deux voies précédemment décrites a également été détectée.

La structuration du bâti montre une dissymétrie de part et d'autre de la voie V1 : les bâtiments au nord de cette dernière sont organisés perpendiculairement à l'axe de circulation et semblent organisés en îlots de 50 m de côté. L'îlot le plus au nord (1) est électriquement légèrement plus résistant que les autres. Les façades nord des bâtiments sont bordées par une longue et fine anomalie linéaire, matérialisant la présence d'un mur (M1) dont l'existence avait été reconnue antérieurement par le sondage 3500 réalisé lors des travaux préparatoires du Shunt (Mougin *et al.*, 1997). Entre les deux extrémités du sondage que sépare le mur de terrasse M1, il est apparu une différence d'altitude de 1,2 m. Un autre mur (M2), perpendiculaire au mur M1, a été détecté par la géophysique. Ce mur semble séparer l'îlot 1 du reste des îlots situés plus au sud.

Les bâtiments au sud de la voie V1 comportent des pièces de plus grandes dimensions que celles des bâtiments situés au nord de la voie. La disposition des murs des pièces dessinent de longs quadrilatères qui se distinguent nettement d'un système en îlots. En se rapprochant de V4, les valeurs de résistivité électrique diminuent et plus une seule structure n'apparaît. Cette absence pourrait s'expliquer par la présence d'un recouvrement limoneux atténuant les contrastes de résistivité entre les structures et le milieu encaissant, ou alors par une érosion plus prononcée dans ce secteur de la prospection.

3.3.2.3 La prospection LiDAR

En comparant les informations obtenues par la prospection LiDAR au plan restituant l'organisation du quartier antique, on observe que l'emprise des voies V1 et V4 correspond sur le terrain à un bombement d'environ 1 m de hauteur, et la chaussée à une surélévation de moindre amplitude, de l'ordre de 25 cm par rapport à la surface de ce bombement, symbolisée en vert sur la figure 137. La rupture au niveau du mur de terrasse, identifiée par une flèche sur la figure est, elle aussi, parfaitement matérialisée. La zone 1, qui apparaît électriquement beaucoup plus résistante sur la figure 135 est aussi bien individualisée sur l'image générée grâce au TPI ce qui laisse penser à une couche de démolition plus importante que dans le reste du quartier et/ou à des vestiges mieux conservés à cet endroit. A l'inverse, deux autres anomalies en élévation notées 2 et 3 ne sont pas reliées à une augmentation notable de la résistivité.

En conclusion, les vestiges du quartier artisanal encore perceptibles dans la microtopographie sont l'axe V1 de la voie du Haut-Empire autour duquel il est structuré, l'axe de la voie V4, les tracés des deux murs de terrasse et l'empreinte des îlots notés 1, 2 et 3. Le reste du quartier est invisible. Les rehaussements successifs des niveaux d'occupation, entrevus par différents sondages et qui sont à l'origine de la morphologie particulière de cette zone attestent de la volonté de protéger le quartier des aléas fluviaux. Par opposition, les stratigraphies des zones 1 et 2 qui le bordent de part et d'autre ne montrent pas de tels aménagements. Leur recouvrement homogène par des limons de débordement déposés lors des crues du Doubs suggère plutôt un abandon précoce de ces secteurs (fig.138).

Si l'on compare la position des anomalies en élévation du modèle TPI au relevé en plan des murgers de la ville romaine à la fin du XIXème (Barbier 1895), on remarque un important décalage entre les anomalies en élévation et les tas d'épierrement cartographiés, malgré un calage du plan ancien prenant en compte comme point de référence l'intersection de voies (fig. 139). Toutefois, en faisant glisser le plan ancien d'une quarantaine de mètres vers l'est, on constate que les deux grands murgers d'orientation NO/SE se superposent parfaitement aux anomalies microtopographiques encore visibles en élévation.

Sur la vingtaine de murgers figurés sur le plan de 1893, seuls sept sont encore visibles aujourd'hui dans la topographie, dont deux correspondant principalement aux voies V1 et V4. D'une manière générale, les autres murgers se localisent le long de l'axe V1.

3.3.3 Les « Combolles » (Mathay)

3.3.3.1 Aperçu des recherches

Le secteur des « Combolles » est situé en rive gauche du Doubs, juste au nord-est de « Faubourg de Pont ». Le plan de 1893 ne montre pas à cet endroit de présence de murgers, susceptible de trahir la présence de vestiges enfouis. L'occupation de cet endroit est surtout connue par les photographies aériennes (Goguey, 1976 ; Augé, 1989, 1990) et les investigations préventives conduites successivement sur les projets de tracés de déviation du « Shunt» en 1997 et 2002, aux lieux-dits « les Oichottes » et « Les Combes » (Mougin et al., 1997, 2002).

3.3.3.2 Les prospections aériennes

Les photographies aériennes révèlent les traces rectilignes d'un réseau de voies, indexées V6, V7 et V8. La voie V6 orientée nord-ouest/ sud-est, relie les structures apparues le long du Doubs à un autre groupe situé plus au nord, sur le sommet de la terrasse Fy (fig.140). La limite entre les terrasses alluviales Fy et Fz apparaît parfaitement bien marquée par un net changement de couleur de la végétation, beaucoup plus claire à l'emplacement des dépôts de graviers de la terrasse Fy. Sur celle-ci, on repère aisément, grâce aux anomalies phytographiques, une anomalie quadrangulaire sombre (B) qui pourrait être un bassin ou une fosse d'extraction de matériaux, un grand fossé linéaire (FL), ainsi qu'une série de fosses juste à l'est du bassin (f). Au sud, les anomalies phytographiques claires (A1 et A2) sont à relier à la présence de constructions. Cependant, il n'a pas été possible de recaler précisément les clichés qui seront utilisés à titre informatif.

3.3.3.3 La prospection magnétique

En 2005, des prospections magnétique et électromagnétique ont été réalisées sur l'ensemble de cette zone, soit une superficie couverte de 11,2 ha (Trillaud, 2005 ; Bossuet *et al.*, 2005). Les résultats de la prospection magnétique sont présentés avec une échelle de couleur variant du noir au blanc pour une valeur décroissante du champ magnétique (fig.141). La dynamique du signal est de 20 nT. Plutôt que la carte du gradient vertical, nous avons choisi de présenter la carte du champ total, mieux à même de faire ressortir les anomalies magnétiques liées aux structures pédo-sédimentaires.

Sur cette carte, la limite entre les deux terrasses, représentée en rose clair sur le schéma d'interprétation, est aisément identifiée. Le système de voirie est également nettement visible et représenté en noir avec les fossés bordiers en vert. Mais on remarque que pour certaines voies, notamment la voie V7, l'empreinte de leur chaussée ne se prolonge pas et que ce sont principalement la trace des fossés que l'on observe. Y a-t-il eu un épierrement de la voie ? Nous proposons plutôt l'idée que seuls les fossés bordiers auraient été installés, mais pas la chaussée de la voie, signe probable d'un début de viabilisation d'un nouveau quartier mais qui n'aurait pas été poursuivi.

Sur le sommet de la terrasse, un nouveau groupe de bâtiments, noté A3 (en rose) apparaît à l'est de la zone où se concentrent de nombreuses fosses, et où des anomalies magnétiques bipolaires indiquent la présence de structures de cuisson. C'est dans cette zone qu'ont été ramassés de nombreux fragments

de verre et de résidus de cuisson en association avec un matériel céramique suggérant la présence de vestiges d'ateliers de travail du verre ayant fonctionné de la deuxième moitié du Ier siècle au début du IIème (Bossuet *et al.*, 2005).

Plus au sud, il n'est pas possible d'identifier la trace de structures bâties, en raison du caractère bruité de la prospection magnétique. Ce bruit correspond à l'effet provoqué sur la mesure de la valeur du champ par la concentration des matériaux de construction à la surface du sol, et notamment des terres cuites architecturales (*tegulae, imbrices*) à forte aimantation thermorémanente. C'est pourtant à l'intérieur de ces zones « bruitées » que la prospection aérienne révèle la trace des murs des constructions sous-jacentes.

Le bassin est lui aussi parfaitement détecté, tout comme le long fossé courant le long de la limite entre les terrasses Fz et Fy. Au centre de la zone, un lambeau de voie apparaît (V9). Il est parfaitement aligné sur le tronçon de voie V10 dont il pourrait matérialiser le prolongement dans cette partie de la prospection.

Les anomalies P1 et P2, figurées en pointillé noir, totalement discordantes par rapport aux orientations du réseau viaire sont d'origine géologique. La confrontation avec la cartographie électromagnétique de la conductivité montre que l'anomalie P1 matérialise l'axe de l'incision d'un large paléochenal qui court en contrebas de la terrasse Fy (fig. 143). On notera que cette zone basse, cartographiée comme zone à fort aléa fluvial sur le plan de prévention des risques (PPRI), est systématiquement inondée comme le montre la photographie de ce secteur prise lors de la crue de février 2006 (fig. 142). Cette remontée des eaux est due dans ce secteur à la fois à la remontée de la nappe et à l'ennoiement des anciens cours du Doubs.

3.3.3.4 Les prospections électriques et électromagnétiques

La mesure de la conductivité apparente du sous sol apparaît comme la méthode la plus efficace pour détecter le tracé des anciens chenaux (Fig. 143). Aux Combolles, cette cartographie montre l'extension des dépôts de graviers de la terrasse Fy (valeurs de conductivité les plus faibles) au sommet desquels se dessine l'emprise de la structure fossoyée B (bassin ?), les incisions de deux paléochenaux et des zones plus résistante (S), qu'il est possible d'attribuer à des bancs de sable. Dans le but d'obtenir des informations sur la géométrie des corps sédimentaires, un panneau électrique a été effectué transversalement à l'axe du chenal, à partir de dix sondages électriques régulièrement espacés de 20 m (fig. 144). Le profil topographique de cette section n'a pas été représenté, mais les altitudes sont décroissantes en allant du sommet de la terrasse Fy à l'ouest vers la zone basse du chenal à l'est.

L'interprétation, réalisée avec le logiciel *IP2WIN*, montre que la terrasse Fy constituée de graviers et de galets correspond à un dôme électriquement très résistant. Puis, en se dirigeant vers l'est, la nette décroissance d'altitude de la terrasse s'accompagne de l'apparition d'un remplissage plus épais et conducteur. On remarque notamment une incision en forme de V, précédant une remontée du substrat résistant. Cette incision correspond bien à la zone de plus forte conductivité du comblement

du chenal. La remontée du substrat à l'est correspond bien à la limite de son extension marquée par un retour à des valeurs plus résistantes sur la carte de conductivité électrique.

3.3.3.6 La prospection LiDAR

La figure 145a présente l'indice de position topographique avec une dynamique du signal allant de -5 à +5 cm. Tout un ensemble de petites élévations linéaires parallèles ou perpendiculaires est disposé en « arêtes de poisson », représentées en vert sur le schéma d'interprétation. Ces anomalies sont de même orientation que celle du réseau viaire reconnu dans ce secteur, certaines se confondant même avec des tronçons de voies. A plus large échelle, l'orientation de ces petites élévations s'aligne sur celles des rues qui structurent en rive droite du Doubs les îlots des quartiers d'habitation. Tous ces éléments conduisent à penser que ces élévations pourraient correspondre aux empreintes laissées par un début de viabilisation de l'espace à l'époque antique (implantation de la voirie), jamais finalisé comme le suggère l'absence de constructions aux abords de ce réseau dans la partie basse inondable de ce secteur.

La comparaison avec le cadastre ancien du début du XIXème indique que le découpage parcellaire laniéré est de même orientation que ces élévations microtopographiques censées matérialiser un état de la trame viaire (fig. 145b), ce qui confirmerait une nouvelle fois la pérennisation très forte des infrastructures d'époque antique dans le paysage moderne (Bossuet *et al.*, 2008,Thivet *et al.*, 2009).

3.3.4 Les « Combottes » (Mandeure)

3.3.4.1 Aperçu de la recherche

Ce secteur est situé en rive droite du Doubs, juste au nord de la fortification du Bas-Empire (*castrum**). Les premières fouilles sur ce secteur sont l'œuvre de J. Bauhin à la fin du XVIème siècle. Les voies et diverses constructions ont été repérées grâce à des sondages préventifs (Lerat, 1968) et des photos aériennes.

3.3.4.2 La prospection électrique

Une fois encore, les meilleurs résultats sont issus de la prospection électrique (fig. 146). La cartographie des variations de la résistivité entre 0 et 1 m de profondeur permet de suivre le tracé de la voie V2 sur 140 m. Cet axe de circulation du Haut-Empire, large de 10 m, structure une grande partie de l'intérieur de la boucle, depuis le complexe cultuel au sud (*cf. infra*) jusqu'aux « Champs Pelletier » plus au nord (cf. infra). Au lieu-dit « les Combottes » cette voie V2 sépare un quartier d'habitation situé à l'ouest des thermes de « Muraillebourg » (Duvernoy, 1880 ; Jeannin, 1986) et des « Grillottes » (*cf. infra*) à l'est.

Plus à l'ouest, la voie V12 se développe parallèlement au cours du Doubs. Son tracé, marqué dans le paysage par une anomalie topographique remarquable, est reconnu sur toute sa longueur par la prospection électrique. Cette voie, large de 5 m, apparaît bordée de structures construites résistantes correspondant soit à des trottoirs et à des caniveaux, soit à des murs de façades ou à des portiques.

On remarque également le tracé de deux autres voies, V11 et V13 qui leur sont perpendiculaires. La voie V11 est très particulière, son extrémité nord-ouest, en forme de fer à cheval, enserre très clairement les vestiges d'un grand bâtiment quadrangulaire dont le plan en deux carrés concentriques évoque celui d'un fanum de tradition indigène. Une autre structure cultuelle de ce type est visible au nord de la voie V13.

Les deux îlots situés de part et d'autre de la voie V12 regroupent des bâtiments à vastes cours carrées, de 30 ou 40 m de côté, dont le plan évoque celui des villas urbaines (domus) de dimensions variables. Certaines possèdent des pièces mais il est important de garder à l'esprit que ces cours pouvaient comporter des structures légères qui n'ont pas été détectées ou qui ont été détruites.

Les petites taches noires de forme carrée ou rectangulaire pourraient signaler l'emplacement des sols construits. Enfin, les doubles anomalies linéaires repérées le long des voies matérialisent vraisemblablement les vestiges de portiques.

3.3.4.3 La prospection LiDAR

La figure 147 présente la carte des pentes de la zone. Les valeurs de pentes sont très faibles, distribuées entre 0 et 3°. La voie V12 est visible sur deux tronçons sous la forme d'une élévation linéaire (en vert, numéros 1 et 2). L'élévation 3 que l'on pourrait interpréter dans un premier temps comme le prolongement de la voie V12 est en réalité dû aux vestiges d'un portique accolé à la voie. Les emprises des deux temples carrés sont encore discernables dans la microtopographie sous la forme de bosses. L'élévation visible au sud du quartier (4) serait plutôt à mettre en relation avec le lotissement moderne juste au sud.

Enfin, la voie V11 apparaît, sur une partie seulement de son tronçon, plutôt en creux (en rouge) alors que les voies V2 et V13 ne semblent pas créer en surface d'anomalie microtopographique.

La figure 148 compare les données microtopographiques avec le plan de la SEM de 1893. On constate une nouvelle fois des imprécisions dans le calage de l'ancien cadastre ; beaucoup des irrégularités du terrain (murgers) visibles au XIXème siècle ont aujourd'hui disparu, principalement celles orientées ONO/ESE. Seul les murgers correspondant à la voie V12, au portique et aux temples ont résisté à l'érosion moderne peut-être parce qu'ils étaient encore à cette époque les plus imposants.

3.3.5 Les « Grillottes » (Mandeure)

Ce secteur est situé à l'est de la voie V2, juste en face des « Combolles ». L'orthophotographie de 2009 présente une anomalie curviligne remarquable dans la croissance des végétaux, et la prospection électrique révèle une structure construite de même forme (fig.149a et 149b). Ces anomalies correspondent également à un microrelief bien marqué sur la couverture aéroportée LiDAR (fig. 149c) ainsi qu'à une concentration importante de pierres taillées et de terres cuites architecturales à la surface du sol.

3.3.5.1 La prospection magnétique

Dans le but d'acquérir des éléments nouveaux sur le plan et la fonction des vestiges repérés, une prospection test basée sur la mesure des propriétés magnétiques du sol a été réalisée à l'automne 2010 dans une partie de la parcelle. Une zone de 0,64 ha (80 x 80 m) a été implantée à cheval sur le dénivelé topographique et prospectée avec un appareil mesurant le gradient de la composante verticale du champ magnétique terrestre. Les quatre blocs de 40 x 40m ont été parcourus à partir de profils équidistant d'1 m et orientés selon une direction est-ouest. A l'acquisition, la résolution spatiale était d'une mesure tous les 50 cm le long des profils. Les capteurs de champ étaient fixés à 40 cm du sol.

Les variations du gradient vertical ont été représentées avec une dynamique du signal comprise entre -15/+15 nT/m. Cette carte du gradient a été ensuite transformée en carte du champ total puis en couche virtuelle de susceptibilité magnétique (couche de 20 cm à 20 cm de profondeur). Les résultats sont présentés sur la figure 2. Les différents traitements effectués sur les données magnétiques révèlent, de manière beaucoup plus claire que ne le montrait la prospection électrique (fig. 149b), le plan des structures enfouies dans cette partie de la parcelle (fig. 150).

On observe tout d'abord un ensemble d'anomalies magnétiques négatives, rectilignes et d'orientation perpendiculaire, qui marquent la présence de vestiges construits (murs) en matériau de type calcaire (fig. 150a). En bordure de la voie du Haut-Empire, également repérée en 2004 par les prospections électriques, ces anomalies dessinent le plan d'un édifice où les pièces semblent dédoublées et disposées symétriquement le long d'un axe d'orientation ONO-ESE (fig. 150b). La prospection magnétique ne révèle qu'une partie de cet édifice qui mesure 65 m de long par 50 m de large et dont une des particularités tient à la présence d'un angle arrondi à l'extrémité nord de sa façade, le reste du bâtiment étant aujourd'hui enfoui (détruit ?) sous les aménagements et constructions modernes qui bordent la parcelle (clôture, route, pavillon).

Le caractère apparemment monumental de l'édifice conduit à penser qu'il pourrait constituer une annexe de l'ensemble thermal public de Muraille-Bourg situé juste au nord de la parcelle des « Grillottes » et fouillé successivement aux XVIIIème et XIXème siècles par L. Parrot et Cl. Duvernoy.

3.3.5.2 Confrontation avec les autres données

La confrontation de ces résultats avec les données LiDAR modélisée sous la forme de courbes de niveau montre une bonne concordance entre l'élévation micro-topographique du terrain (de l'ordre de 80 cm) et la présence du bâtiment détecté par la prospection magnétique (fig. 151a). La voie du Haut-Empire, bien détectée par la prospection magnétique est également visible sur l'orthophotographie de 2009 : elle est matérialisée par une anomalie phytographique de couleur claire, conséquence d'une croissance plus lente des végétaux au droit de la chaussée de la voie antique (fig. 151b). Cette voie était par ailleurs visible sur la prospection électrique ARP de 2004 avec les dispositifs à 0,5 m et 1m de profondeur (fig. 149b). Par contre, alors que l'anomalie phytographique hémicirculaire correspond à une anomalie électriquement résistante de même forme, aucune correspondance équivalente en terme d'anomalie sur la carte de la prospection magnétique par ailleurs beaucoup plus détaillée,

n'est observée (*cf. supra*). Cette différence pourrait s'expliquer par l'affleurement, à l'emplacement de l'anomalie topographique, d'un placage compact mais peu épais de matériaux (type couche de démolition), influençant fortement la résistivité électrique du sol mais n'influençant pas les capteurs de champ magnétique à la hauteur choisie pour cette prospection (40 cm).

3.3.6 Les « Champs Pelletier » (Mandeure)

3.3.6.1 Aperçu de la recherche

Le secteur de « Champs Pelletier » situé en rive droite du Doubs, juste au nord des « Combottes » appartient lui aussi au cœur de la ville antique. Les fouilles les plus anciennes dans ce secteur sont l'œuvre de Duvernoy (Duvernoy, 1880). Sur une surface de fouille de 500 m², elles ont mis au jour un bâtiment de plus d'une dizaine de pièces, dont certaines décorées d'enduit peint. Le plan Morel-Barbier de 1893 consigne aussi un grand nombre d'informations sur la trame viaire dans cette partie de l'agglomération.

Au cours du XXème siècle, de nombreux sondages préventifs ont permis de découvrir des rues, des caves, des silos, des puits et d'autres pièces dont les murs étaient recouverts d'enduit peint (Lerat, 1960 ; Jeannin, 1974 ; Morel, 1976). Signalons le possible aménagement de berge (débarcadère ?) détecté au niveau du barrage par Pierre Mougin lors de fouilles de sauvetage exécutées en 1993 (Mougin, 1994). Le redressement des photographies aériennes les plus informatives couplé à l'étude du plan Morel-Barbier de 1895 avait permis de restituer un premier document visualisant l'implantation de la ville antique et de ses principaux édifices (Jeannin, 1986).

3.3.6.2 La prospection électrique

Une fois encore, les prospections électriques de 2004 et de 2006 fournissent les informations les plus détaillées sur l'occupation de ce secteur.

La figure 152 présente les variations de la résistivité apparente mesurées entre la surface du sol et 1 m de profondeur. Cette cartographie électrique révèle un grand nombre des vestiges construits de la ville antique (bâtiments, rues et voies) fossilisés dans leur environnement sédimentaire fluviatile.

En premier lieu, une variation régionale de la résistivité sépare une zone sud, plus sombre donc électriquement plus résistante, d'une zone nord, beaucoup plus claire, donc plus conductrice. La zone sud plus résistante, constituée de dépôts grossiers, dessine une butte sablo-graveleuse (*cf*. partie 4). Sa forme en arc de cercle évoque la trace d'une ancienne courbure de la rivière. Au-delà de cette butte les figures sédimentaires d'anciennes berges : anomalies curvilignes (2 et 3) et celles de bancs sableux en forme de biseau matérialisent les étapes successives de la migration de ce méandre vers le nord, comme l'illustre l'augmentation du rayon de courbure de ces biseaux à mesure que l'on progresse vers la partie convexe de la rivière.

Dans ce secteur, on retrouve le tracé des deux voies, V2 et V12, qui structurent plus au sud le quartier des « Combottes ». Ces deux axes sont toujours parallèles, mais si V12 se prolonge jusqu'au nord de la boucle, V2 semble s'arrêter au contact de la voie V20 ; au-delà de ce point le découpage des îlots est

assuré par des tronçons de voies de 5 à 7 m de large, à peu près parallèles et de même longueur : V17, V14, V15, V16, et V23. Un examen plus attentif permet de remarquer que les tronçons de voies V16 et V14 sont isoclines à V12 alors que les tronçons de voie V23, V15 et V17 sont strictement parallèles entre eux et présentent une orientation décalée de 5° par rapport aux précédents. La différence d'orientation entre ces deux groupes de voies pourrait marquer deux étapes dans la réalisation de la trame viaire. Ces voies sont recoupées perpendiculairement par les voies V19, V20 et V21 qui définissent le contour des ilots d'habitation. L'orientation discordante de la voie V18, résulte peut-être d'une adaptation étroite du schéma d'urbanisme à la courbure du méandre de la rivière. Enfin la voie V24, implantée sur une paléoberge, se développe dans le lit mineur en courant parallèlement au cours actuel du Doubs.

A l'intérieur des îlots d'habitation, la carte de résistivité révèle toute l'organisation du bâti sous la forme d'anomalies résistantes linéaires et orthogonales qui matérialisent les murs des différentes constructions. Au nord, dans la zone conductrice et inondable, les constructions apparaissent moins visibles car elles sont recouvertes par des limons de débordement. Le long de la voie 24 dont le tracé rejoint l'emplacement d'un possible embarcadère, la prospection électrique a détecté plusieurs rangées de petites constructions modulaires allongées dont la disposition évoque clairement celle d'entrepôts (*horrea**) (Reddé *et al.*, 2006).

Enfin, un grand espace rectangulaire très conducteur par rapport au reste de la zone des « Champs Pelletier » apparaît (4). Très peu de structures construites sont discernables, y compris sur la carte à plus grande profondeur (écartement 2 m). On ne peut pas proposer pour le moment d'explication à cette variation de densité observée dans la répartition des vestiges. Toutefois cette zone est plus basse que le reste du quartier et un réseau de paléochenaux semble la traverser (*cf. infra*).

3.3.6.3 La prospection LiDAR

La figure 153 présente le modèle TPI auquel sont superposées les altitudes. Une partie des tronçons de voies détectées par la prospection électrique (V12, V15 et V21) apparaissent sous la forme d'élévations (1, 2 et 3) d'une hauteur respective de 60 cm, 20 cm et 80 cm. Deux élévations (4) de 40 cm de hauteur, identifiables de part et d'autre de la voie V14, marquent vraisemblablement la position des vestiges de deux constructions bordant cet axe de circulation.

La zone électriquement résistante, interprétée comme une butte sablo-graveleuse, apparaît comme un espace nettement plus élevé (de l'ordre de 3 m) que le reste du quartier antique. En contrebas de cette butte, en se dirigeant vers le nord-est, on n'observe plus de variation remarquable du microrelief, avant d'arriver à une série de dépressions linéaires (en rouge) (5) qui signalent l'emplacement de paléochenaux dans la zone la plus basse et la plus inondable (cf. carte de l'aléa fluvial. PPRI partie 4).

Le plan des ruines de la ville romaine de la fin du XIXème siècle (fig. 154) indique, comme la prospection LiDAR de 2009, que les murgers se distribuent exclusivement dans la zone de plus haute altitude générale (tons orangés et rouges sur la figure 153). Toutes les structures repérées plus au nord de cette zone, grâce aux prospections géophysiques et aux photographies aériennes, ne laissent

aucune trace dans la microtopographie. Le nivellement de cette zone par les recouvrements limoneux est probablement à l'origine de ce phénomène.

3.3.6.4 Conclusion

L'analyse des relations entre les occupations protohistoriques et antiques et la dynamique alluviale à l'intérieur de la boucle nécessite de pouvoir dater les étapes de migration du méandre et la durée de fonctionnement des paléochenaux. Sans cela, il est impossible de relier des périodes d'occupations à des paléoformes de la rivière.

3.3.7 Le complexe monumental cultuel (Mandeure)

3.3.7.1 Aperçu de la recherche

Ce complexe monumental se situe en rive droite, au sud du cœur de l'agglomération antique. Il était connu par l'existence d'un grand temple, situé au lieu-dit « Cloux du Château » en vis à vis du théâtre antique, qui est le seul monument encore conservé en élévation. Le grand temple fut l'un des premiers édifices exploré à la fin du XIXème siècle (Duvernoy, 1883). Un siècle plus tard, la présence d'une fortification « castrum » supposée par la microtoponymie « Champs des Cloux du Château » et le découpage parcellaire était confirmée par les fouilles préventives ouvertes sur une tranchée de gazoduc (Jeannin 1984).

Jusqu'aux années 2000, le grand sanctuaire à péribole subcirculaire était le seul édifice religieux identifié dans l'environnement proche du théâtre où la prospection aérienne avait livré peu d'indices archéologiques. Au cours des quinze dernières années, la connaissance de l'organisation de ce complexe sanctuaire-théâtre a considérablement progressé en particulier grâce aux investigations géophysiques (prospection électrique, magnétique, radar) réalisées sur une emprise de 10 ha autour du théâtre antique et aux sondages archéologiques de contrôle ouverts sur les indications fournies par la géophysique (Jacob & Jeannin, 1986 ; Dabas & Aubry, 1997 ; Mazimann, 1999 ; Mougin, 2000 ; Bossuet et al, 2006 ; Thivet, 2008 ; Thivet & Nouvel, 2009 ; Barral *et al.*, 2007a, 2010). Ces prospections ont révélé l'existence d'un nouveau sanctuaire à péribole au lieu dit « Champs des Fougères », d'édifices à plan centré et d'enceintes aux « Ouchottes », au sud du théâtre.

3.3.7.2 La prospection électrique

La carte de résistivité apparente dressée avec un écartement des électrodes de 1 m a mis en évidence (fig.155) les anomalies de nombreux vestiges de constructions et de paléoformes fluviales. L'organisation générale de ce vaste ensemble cultuel révèle quatre composantes principales, localisées aux angles d'une grande enceinte quadrilatérale qui clôt ce complexe : dans l'angle nord, le sanctuaire du *Champ des Fougères* ; dans l'angle sud, « *aux Ouchottes* », un groupe d'édifices ; dans l'angle ouest, le grand sanctuaire du *Clos du Château* ; dans l'angle est, le théâtre. Il faut ajouter à cette description la fortification en cloche du Bas Empire, accolée au Doubs.

Les principaux éléments repérés à l'intérieur de ce quartier peuvent être décrits comme suit :

- au nord-ouest du théâtre, un sanctuaire est situé au lieu-dit «Champs des Fougères». Son péribole à pans coupés apparaît sous la forme d'une double anomalie résistante hémicirculaire. A proximité immédiate ont été découverts au XIXème siècle les fragments de deux statues colossales, identifiées comme représentation de Mars et sa parèdre Bellone (Pichot 1996)

- à l'ouest du sanctuaire du champ des Fougères, est localisé le castrum du Bas-Empire. Le large fossé de l'enceinte de fortification est détecté sous la forme d'une anomalie conductrice. Dans l'axe médian de l'enceinte, on observe une voie V 26 datée du Bas Empire. L'empreinte de la Voie Haut-empire V2, détectée sous les niveaux d'occupation du castrum, se prolonge à l'extérieur de l'enceinte pour rejoindre un point de franchissement de la rivière

- en vis-à-vis du théâtre se trouve le grand sanctuaire du *Clos du Château*. A l'intérieur du péribole ovale, la prospection électrique a révélé l'angle d'un bâtiment dont l'orientation est clairement discordante (45°) de celle des trois murs de la façade sud du temple. A l'extérieur de ce péribole a été reconnu un large espace de circulation en forme d'anneau, nettement circonscrit par un dispositif de clôture polygonal

- au sud du théâtre sont repérées les nombreuses traces de vestiges édifiés sur le replat de la basse terrasse alluviale. Il s'agit d'un ensemble complexe associant des constructions (vestiges de massifs maçonnés) à des enceintes polygonales (5), chronologiquement distinctes. En contrebas de la terrasse, un alignement d'anomalies conductrices (grosses fosses) (6) se développe dans l'emprise d'un ancien chenal

- le grand mur d'enceinte (M1, M2, M3) et les éléments de voirie associés (V2) ferment sur trois côtés l'aire du complexe cultuel

- trois autres tronçons de voie structurant l'espace cultuel ont été détectés. La voie V3, prolongée par le tronçon V25 rejoindrait depuis le nord-est le grand sanctuaire du « Clos du Château ». Le tronçon V25 est composé de deux voies parallèles (1 et 2 fig. 155). Leur recoupement par la tranchée d'exploration ouverte en 2003 a montré que la voie située la plus à l'est (2) était la plus récente (Bossuet *et al.*, 2003). Celle située le plus à l'ouest (1) semblait ne pas se poursuivre au-delà de l'incision d'un paléochenal. Depuis le point de franchissement du Doubs, la voie V27 rejoint le sanctuaire des « Cloux du Château » à partir de la voie V2 en traversant le mur M3. L'analyse de la carte de résistivité apparente avec un écartement des électrodes égal à 2 m révèle un élargissement des fondations du mur à ce niveau qui pourrait être attribué au percement d'un passage similaire à celui détecté plus au nord, correspondant à un arc monumental à une seule baie, long de 5,7 m et large de 2,6 m environ, dont ne subsistait que le soubassement en blocs de gros appareil (Monnier *et al.*, 2006).

3.3.7.3 Les prospections magnétique et radar-sol

Les prospections radar et magnétique réalisées « aux Ouchottes » complètent la vision du groupe de constructions édifiées sur la terrasse alluviale. La prospection magnétique effectuée en 2001 à l'aide

d'un gradiomètre fluxgate Ferex CON 60. couvre une zone de 1,5 ha à fort dénivelé : l'altitude passe de 335 m au bas de la pente, à l'ouest, à 341 m à l'est.

Les résultats de cette prospection (fig.156) montrent au moins deux édifices à plan centré (a et b). L'édifice (a) est une structure construite de plan rectangulaire, de 31 x 24 m, à exèdres semi-circulaires. A l'intérieur de ce bâtiment figurent plusieurs murs dont l'orientation discordante (45°) signale un état de construction différent. Au Sud de la prospection, le mur d'enceinte de l'espace cultuel apparaît comme une anomalie négative linéaire.

L'édifice (b), parfaitement aligné sur le côté est du bâtiment (a), est une structure de 23 m de côté formé de deux carrés concentriques définissant une galerie de 3,50 m. Les structures (c), plus proches du pied du coteau, présentent des formes géométriques rectangulaires. Leur orientation différente de celles des structures (a) et (b) ne permet pas d'exclure une liaison fonctionnelle avec elles. Elles pourraient correspondre à des systèmes d'adduction et de réserve d'eau comme le suggèrent les observations anciennes (Dunod, 1709 ; Duvernoy, 1875 ; Bossuet *et al.*, 2001).

Plus au nord, les anomalies détectées à proximité du théâtre dessinent des formes géométriques moins marquées. Nous proposons de reconnaître cependant en (d) une structure de forme rectangulaire, accolée à une anomalie linéaire (e). L'orientation de ces anomalies n'apparaît pas discordante par rapport à celle des anomalies repérées plus au sud dans la prairie (bâtiments (a) et (b)), suggérant une appartenance possible au même complexe monumental. Enfin, en avant du bâtiment (a), une anomalie négative circulaire pourrait suggérer la présence d'un puits.

L'atténuation du contraste dans les propriétés magnétiques entre la partie ouest et la partie est de la prospection résulte de la présence d'un colluvionnement recouvrant uniformément les vestiges les plus proches du pied du versant.

Les résultats de la prospection radar-sol (fig. 157) précisent le plan des deux bâtiments (a) et (b). La coupe profondeur (depth slice) est présentée entre 1 m et 1,1 m sous la surface du sol. Le premier édifice (a) de forme quadrangulaire serait bordé intérieurement d'une colonnade sur trois de ses côtés et présenterait bien une exèdre à terminaison semi-circulaire sur sa façade nord. Le second édifice (b) est constitué de deux carrés concentriques avec des murs doublés de colonnades sur la façade ouest.

La présence en pied de versant de colluvionnement et de dépôts fluviatiles fins, constitués de sédiments argileux à constante diélectrique élevée 0,06 ns/m explique l'atténuation enregistrée durant la propagation des ondes radar et l'absence de structures réflectives détectées dans cette zone (Bossuet *et al.*, 2001 ; Bossuet & Thivet, 2006)

Deux larges structures réflectives de même orientation et interprétées comme des massifs maçonnés ont également été détectées. Elles correspondent aux deux anomalies résistantes cartographiées en prospection électrique avec le dispositif le plus intégrant (écartement à 2 m), confirmant ainsi l'enracinement de ces deux structures.

La synthèse des données permet aujourd'hui de conclure qu'il s'agit d'un ensemble très complexe. Il associe les vestiges d'édifices cultuels, chronologiquement distincts. Il convient toutefois de s'interroger sur la nature des structures détectées par les différentes méthodes. Les deux bâtiments a et b apparaissent nettement sur les cartes radar-sol et magnétiques mais sont indétectables avec la prospection électrique.

3.3.7.4 La prospection LiDAR

Le modèle TPI (fig.158) nous montre que la voie V26 (1) et le mur d'enceinte du *Castrum* (2) sont aujourd'hui encore marqués dans le relief par des élévations d'altitude atteignant respectivement 50 et 20 cm. Une autre élévation (3) s'observe juste à l'extérieur du mur nord (M5) de la grande enceinte du complexe cultuel. Il pourrait s'agir de la voie repérée en 2009 lors des fouilles du sanctuaire du « Champs des Fougères » (Nouvel & Thivet, 2009).

L'espace de circulation circonscrit au péribole subcirculaire du sanctuaire des « Cloux du Château » est également très visible dans le microrelief (4), mais cette élévation microtopographique n'en suit pas exactement le contour, notamment sur sa partie est (cf. infra).

A l'intérieur du péribole, trois élévations parallèles sont visibles. L'autre élévation (5) proche du sanctuaire est plutôt à mettre en relation avec le parcellaire napoléonien L'origine de l'élévation (6) se rattache aux pratiques agricoles modernes. La double élévation (7) située sur la terrasse alluviale correspond bien aux deux masses résistantes observées en prospection électrique.

La figure 159 compare le plan des anomalies microtopographiques détectées par le LiDAR au plan des ruines romaines publié à la fin du XIXème siècle. Les murgers localisés à l'emplacement du grand temple des « Clos du Château » apparaissent sous la forme de trois élévations parallèles. L'élévation correspondant à la voie V26 était visible sous la forme de trois murgers, celui situé juste au nord permet de clore l'enceinte du *Castrum*. Toutes les autres élévations recensées grâce à la prospection LiDAR n'apparaissent pas sur le plan de Morel-Barbier. Il faut dire que la plupart des élévations, qui sont dues soit au parcellaire napoléonien soit au parcellaire contemporain, n'ont pas dû être considérées comme étant d'origine archéologique.

3.3.8 Le plateau à l'est du théâtre

3.3.8.1 Aperçu des recherches

Le plateau au dessus du théâtre, actuellement occupé par des prairies a fait l'objet d'explorations archéologiques ponctuelles. Des sondages réalisés à l'occasion de l'extension du cimetière à l'extrémité nord du plateau et lors de la construction d'un hangar agricole au centre du plateau à une centaine de mètres du théâtre n'ont révélé aucune occupation. En revanche, une enceinte de plan quadrangulaire, constituée de deux fossés (camp de cohorte ?) a été repérée par R. Goguey sur des clichés aériens pris en 1976 et 1978 ainsi que des traces de constructions le long du versant nord du plateau (fig. 160). D'autres vestiges de construction (fragments d'architecture, mur en petit appareil) avaient été également observés au XIXème siècle et plus récemment à l'emplacement de l'église

Notre Dame de consolation (Marc & Mougin, 2001), là où F Morel Macler a dessiné d'importants murgers en forme de pi renversé sur le plan publié en 1895. La localisation sur ce même plan, à 50 m au sud du théâtre, de deux rangées d'urnes cinéraires sur 50 m de long, découvertes en 1784 reste invérifiable.

C'est à partir de 2006 et des premiers sondages entrepris perpendiculairement à l'arrière du théâtre par J-Y Marc qu'ont été révélés les vestiges construits d'une occupation et de son important potentiel stratigraphique.

Des prospections magnétiques menées en 2002 sur le sommet du plateau avaient livré également d'autres indices archéologiques (voirie ?) apparus sous la forme d'anomalies rectilignes et parallèles (Bossuet *et al.*, 2002). En 2007, une bande d'une trentaine de mètres de large qui longe le bord du versant nord du plateau et se termine à l'arrière du théâtre avait été prospectée à titre d'essai avec le système ARP. Cette exploration avait confirmé la présence de vestiges de constructions échelonnées depuis le pied du versant jusqu'au sommet du plateau (Bossuet & Thivet, 2007).

3.3.8.2 La prospection électrique

Au vu des résultats très positifs de ce premier test, la prospection électrique de la totalité du plateau a été entreprise au printemps 2009. Cette prospection visait à apporter de nouvelles données sur l'occupation de cet espace et notamment sur l'hypothèse de la présence d'un forum formulée dès 1990 par P. Gros et rappelée en 2001 par J-Y. Marc dans le premier rapport du PCR (Marc & Mougin, 2001).

Sur l'ensemble de la zone, soit 4,8 ha, la prospection montre des variations importantes de la résistivité électrique apparente, comprises entre 10 et 1800 ohms par mètre (fig. 161a). Les cartographies aux différentes profondeurs révèlent des anomalies « régionales » de résistivité en relation avec la géologie superficielle (substratum calcaire, colluvionnement) et des anomalies « locales » en relation avec la présence de structures archéologiques enfouies ou avec celle d'accidents affectant le toit du substratum (cassures, fentes). Sur le schéma d'interprétation, sont représentées en noir les anomalies repérées grâce aux photographies aériennes, en rouge les anomalies électriques résistantes et en bleu les anomalies électriques conductrices. Des traces archéologiques reconnues par la photographie aérienne, retenons la voie V29 dont le tracé est-ouest longe le fossé nord de l'enceinte quadrangulaire, le camp à angles arrondis en forme de « carte à jouer », ainsi qu'une forme rectangulaire en arrière du théâtre.

Les variations régionales de la résistivité du sous sol, avec un écartement des électrodes égal à 0,5 m, révèlent des zones à fond sombre, c'est-à-dire résistantes et à fond clair. Les zones sombres correspondent en fait au dessus du plateau et aux zones de forte pente orientées vers le nord. Une érosion sur les pentes ainsi qu'un lessivage du plateau ont pour conséquence de mettre le substrat calcaire quasiment à l'affleurement. Une zone plus conductrice est située sur le replat au nord entre les cotes 348 m et 346 m, cette augmentation de la conductivité du sous-sol est probablement due à un apport de matériaux par colluvionnement.

La « petite combe » sépare en deux le plateau selon une direction nord-sud. Elle apparaît elle aussi comme une zone plus conductrice, faisant office de réceptacle au colluvionnement. La forte amplitude des variations enregistrées dans la résistivité du sous sol rend la lecture des structures plus difficile qu'à l'accoutumée. Nous avons donc effectué des filtrages, qu'ils soient directionnels ou directement sur le spectre. Un exemple de résultats est présenté figure 161b.

En suivant la pente topographique du plateau de 334 à 359 m, la prospection géophysique révèle tout d'abord dans la partie la plus basse, en longeant le cimetière actuel, deux ensembles d'anomalies linéaires et orthogonales (C1, C2), électriquement résistantes, qui matérialisent les murs de constructions de plans rectangulaires édifiés en bordure du versant nord du plateau (fig. 161). L'implantation des bâtiments respecte d'abord une orientation schématiquement est-ouest (C1) avant de s'infléchir progressivement pour suivre, en s'élevant, (C2) l'arrondi dessiné par le bord de la falaise.

A hauteur du changement d'orientation qui affecte l'alignement des deux ensembles de constructions, deux anomalies conductrices parallèles (V28) se développent selon une direction nord-sud, identique à celle des fossés de la voie repérée en 2002 par la prospection magnétique (Bossuet *et al.*, 2002). Cette voie aboutit à son extrémité sud sur deux petites anomalies résistantes, de forme carrée, correspondant peut-être à des massifs maçonnés (M). Sans plus de certitude, l'ensemble de constructions (C1, C2) détectées le long du versant nord pourrait correspondre à des installations (entrepôts, boutiques ?) en relation avec la fonction d'accueil du théâtre comme édifice de spectacle. L'orientation de ces constructions, installées en périphérie de l'agglomération apparaît parfaitement cohérente avec celle du quadrillage (9° et 99°) qui, dans boucle du méandre, structure toute la trame urbaine au sud de la voie du Rhin. Ces constructions, encore visibles sur la cartographie de la résistivité réalisée entre 0 et 2 m, apparaissent profondément enracinées dans le sol.

Entre les cotes 345 et 355 m, la cartographie de la résistivité aux 3 profondeurs révèle, sur les flancs nord et est du relief du plateau, la présence de deux anomalies conductrices (fossés F1, F2) formées de segments rectilignes épousant le tracé des courbes de niveau. La fonction de ces fossés reste pour l'instant indéterminée. Le relief du plateau calcaire semble présenter sur son flanc nord des traces d'aménagement (TA). Plus à l'ouest, la cartographie de la résistivité à faible profondeur (0 à 50 cm) révèle des alignements d'anomalies parallèles (résistantes ou conductrices), espacés de 15 à 20 m, et se recoupant à angles droits (C3). Ces anomalies, dont la lisibilité s'atténue avec la profondeur, pourraient correspondre à des vestiges (murs, tranchées de fondation ?) très érodés et vraisemblablement conservés sur une faible épaisseur. Ces anomalies semblent délimiter sur au moins deux côtés perpendiculaires un espace à l'intérieur duquel il est possible d'identifier d'autres anomalies dont une anomalie conductrice de forme quadrangulaire B1 (10 x 6 m) correspondant à une structure en creux (bassin ?). D'autre part, une structure de même type (B2) est présente mais de plus petite dimension (7 x 4 m). Elle est détectée à hauteur de la chapelle Notre Dame de la Consolation.

Au vu de la forme et de l'agencement des anomalies repérées sur le replat du plateau du Lomont, il est possible de conclure à la présence certaine de vestiges de constructions, correspondant à plusieurs

aménagements mais dont on ne peut restituer précisément le plan compte tenu de leur mauvais état de conservation. Dans ces conditions, il est très difficile de se prononcer sur la réalité d'une occupation monumentale de ce plateau.

Plus à l'ouest, dans l'espace situé immédiatement à l'arrière du théâtre, des anomalies linéaires résistantes (murs) pourraient indiquer la poursuite des constructions fouillées plus au Nord. Dans ce même secteur, les cartes révèlent plusieurs anomalies conductrices linéaires (fossés F3) orientées schématiquement nord/est-sud/ouest, dont les tracés convergent en direction de la limite sud de la prospection ; à ces anomalies linéaires semblent être associées d'autres anomalies dessinant des alignements de structures fossoyées (E2) ou des structures quadrangulaires remarquables (E3). Ces anomalies se surimposent à d'autres anomalies conductrices parallèles, orientées nord-sud. L'intrication des anomalies et l'absence d'indices observables à la surface des parcelles prospectées (prairie) ne permettent pas pour l'instant d'en préciser avec certitude l'origine, géologique et/ou archéologique.

Enfin, plus à l'est, les cartes électriques révèlent sous la forme d'une double anomalie conductrice (E1) une partie du plan de de l'enceinte quadrangulaire (66 m x 53 m) constituée de deux fossés et repérée par R. Goguey en 1976. Edifiée selon une direction nord-sud sur une partie haute du plateau, cette enceinte présente un plan en forme de carte à jouer (angles arrondis) caractéristique de celui d'un camp militaire. Au contact du fossé nord du camp, la prospection montre une double anomalie conductrice (V30) rectiligne dont le prolongement aboutit sur l'axe de symétrie du théâtre. Cette anomalie qui suit actuellement le tracé d'un chemin d'exploitation pourrait prolonger le tronçon de voie de même orientation repérée sur l'autre moitié du camp par les prospections aériennes de 1976-1978 (V29) (Bossuet *et al.*, 2003, 2008). A l'intérieur et à l'extérieur de la double enceinte, les cartes de résistivité à 0-1 m et 0-2 m détectent d'autres anomalies conductrices révélatrices de structures fossoyées (fosses, fossés). Au sud de l'enceinte, ces anomalies linéaires dessinent clairement une forme quadrangulaire (E4), orientée à 45° et discordante par rapport à l'orientation du camp. Au nord-ouest, il est possible d'identifier dans deux zones d'affleurement du calcaire les segments d'un long fossé curviligne (F4) révélé sous la forme de deux anomalies conductrices.

3.3.8.3 La prospection LiDAR

Le Sky View Factor de la zone située à l'arrière du théâtre antique révèle tout un ensemble d'anomalies du micro relief (fig. 162), associées assurément aux limites parcellaires cadastrales du XIXème siècle, et d'autres anomalies, linéaires ou plus ponctuelles, d'orientation discordantes, figurées en vert sur le schéma d'interprétation.

L'anomalie (1), sorte de construction carrée, conservée en élévation sur une hauteur de 20 cm , est clairement révélée sur au moins trois côtés (murs ?). Plus au sud, une anomalie rectiligne en creux (2) semble prolonger la voie V29 au-delà de l'enceinte du camp pour aboutir à hauteur de l'axe médian du théâtre ; cette anomalie se superpose parfaitement aux deux fossés conducteurs de la voie V30 reconnus en prospection électrique. On remarque par ailleurs que les structures résistantes semblent

se distribuer uniquement au nord de cet axe de circulation. Faut-il y voir une limite structurante de l'occupation en arrière du théâtre ?

Une petite élévation, notée (3), correspond quant à elle à l'un des massifs maçonnés détectés en prospection électrique (M). L'anomalie (4), conservée en élévation, dont le tracé épouse la courbe de niveau 348 m pourrait compléter l'aménagement de la pente déjà entrevue avec la détection de deux fossés F1 et F2. Enfin, l'élévation notée (5), située dans la zone où se concentre le plus grand nombre de structures repérées, suit grossièrement le tracé du rectangle observé en photographie aérienne. Elle enserre ainsi la grande structure conductrice située entre B1 et B2. Une branche de cette structure, orientée est-ouest correspond à une structure linéaire résistante (mur ?).

3.3.8.4 Confrontation avec le parcellaire napoléonien

La confrontation des images géophysiques et microtopographiques (fig. 163) avec le plan parcellaire cadastral napoléonien de 1836 montre, une nouvelle fois, la forte rémanence dans le paysage moderne d'orientations cohérentes avec celles d'infrastructures connues d'époque antique comme par exemple l'enceinte de la fortification des « Cloux du Château » ou celle supputée du sanctuaire de « Courcelles » à l'est de l'agglomération antique (Bossuet *et al.*,2008, Thivet *et al.*, 2009).

Sur le sommet du plateau, on remarque que l'emprise de la voie bordée (V28) coïncide parfaitement sur l'ancien cadastre avec un groupe de parcelles dont l'orientation nord-sud apparaît totalement discordante avec celle perpendiculaire des parcelles environnantes. Sur ces parcelles se localisent les vestiges de constructions des ensembles C1 et C2. Un phénomène comparable s'observe en arrière du théâtre où l'orientation du découpage parcellaire change avec celle des structures archéologiques détectées. En ce qui concerne les structures agraires anciennes, on observera que l'alternance élévation/dépression de forme curviligne, visible au sud de l'image LiDAR correspond parfaitement au découpage du parcellaire napoléonien, encore fossilisé dans le paysage actuel.

3.3.8.5 Conclusion

Les prospections géophysique et LiDAR complètent avantageusement la connaissance initiale que l'on avait de l'occupation du plateau même si l'identification du plan et de la fonction d'une partie des structures détectées restent problématique.

La localisation d'anomalies microtopographiques et électriques délimite un espace préférentiellement aménagé (voirie, entrepôts, boutiques, bassin, murs, fossés) situé en arrière du théâtre et apparemment circonscrit aux tronçons de voies V28 et V30. Le fort lessivage du plateau superposé à un probable réemploi des blocs des structures, comme c'est cas dans toute la ville antique, ont trop effacé les traces pour proposer une interprétation fiable.

3.3.9 Le sanctuaire du Clos du Château

3.3.9.1 Aperçu de la recherche

Face au théâtre antique, l'emprise du grand sanctuaire de Mandeure s'étend principalement au lieu-dit dénommé « Champs des Petits Cloux du Château » (fig. 164). Avant son exploration par les fouilles de la fin du XIXème siècle, ce sanctuaire était déjà perceptible dans la topographie des ruines romaines sous la forme de trois bombements parallèles (murgers) figurés sur les plans de Golbéry (1830) et de Morel-Macler (1847) reportés également sur le plan d'ensemble du site paru en 1895 (fig. 164a).

De 1880 à 1882, les fouilles supervisées par Clément Duvernoy à l'emplacement du sanctuaire virent le dégagement de soubassements d'un édifice rectangulaire de grande dimension au centre d'un dispositif de clôture subcirculaire. Ces premières fouilles aboutirent à la formulation de deux hypothèses : la première, développée par Castan, proposait de lier les structures découvertes à un capitole (Castan, 1882). La seconde, soumise par Henri L'Epée, reliait ces dernières à un cirque pour courses de char en raison de l'espace libre entre le péribole et le temple et de la découverte de nombreuses clochettes.

Dès 1883, Clément Duvernoy entreprend à nouveau des fouilles à partir de l'est de l'enceinte. Ces fouilles ont donné lieu à l'établissement d'un plan levé par H. L'Epée dont il existe deux versions : l'une publiée par C. Duvernoy en 1883 (fig 164b), la seconde, avec quelques ajouts, reportée sur le plan d'ensemble du site de 1895 (fig 164a). Le plan de 1895 rajoute un mur au niveau de la façade nord du dispositif central et un *Antéridès* servant à soutenir l'édifice central. Une autre particularité architecturale réside dans le fait que le bâtiment central ne possède pas le même axe de symétrie que le péribole.

C'est H. Koethe qui, en 1933, interprète pour la première fois les vestiges découverts comme ceux appartenant à un temple et à son péribole circulaire (Koethe, 1933). Le plan du péribole du grand sanctuaire des « Cloux du Château », de forme circulaire est une particularité de l'architecture religieuse Séquane (Marc & Blin, 2009). Cette forme est en effet reprise par le plan du temple de Chamars à Besançon mais également par le sanctuaire du « Champ des Fougères», second temple à péribole circulaire découvert à Mandeure en 2002 par la prospection géophysique et fouillé depuis 2007 par P. Nouvel et M. Thivet (Bossuet et al, 2002, Nouvel et Thivet, 2009).

En dehors des plans anciens et des sources manuscrites, les seuls documents disponibles consistent dans les lots mobiliers récoltés à cette époque, dispersés entre plusieurs musées (Barral et *al.* 2007a, Barral et *al.* 2009).

3.3.9.2 La prospection électrique

La prospection électrique de 2007 (fig. 165) révélait au nord et au sud du bois plusieurs anomalies géophysiques caractéristiques informant sur la nature des vestiges architecturaux encore enfouis dans le sol, à savoir :

- une anomalie curviligne (AP),
- une anomalie résistante à pans coupés (AC),
- un triplet d'anomalies résistantes (TM).

Ces anomalies étaient interprétées comme les vestiges du péribole subcirculaire, d'une aire de circulation de 10 m de large circonscrite à ce péribole et des murs parallèles de la façade sud du bâtiment central (fig.165) (Bossuet & Thivet, 2007 ; Thivet, 2008).

La superposition de l'image géophysique et du relevé en plan coté du sanctuaire montrait un ajustement parfait de l'emprise de la façade sud du bâtiment central, avec le triplet d'anomalies électriques (TM) mais un décalage du péribole de 8 m vers le sud par rapport à l'anomalie curviligne (AP) censée lui correspondre.

Ce décalage correspondait exactement à la différence mesurée sur le plan, entre les distances séparant l'intérieur de l'enclos des murs extérieurs des façades nord et sud du temple, à savoir respectivement 25 m et 33 m (fig. 164b).

A partir de cette constatation, les auteurs formulaient l'hypothèse que le plan avait pu être mal orienté. En imposant une rotation de 180° à ce plan, ils arrivaient à ajuster simultanément et de façon satisfaisante le péribole et la façade sud du temple aux anomalies géophysiques (AP) et (TM) censées en matérialiser les vestiges (fig.166).

Malheureusement, la façade est du bâtiment central n'ouvrait plus alors sur le théâtre, mais sur le Doubs, ce qui était en contradiction avec les indications figurées sur le plan (fig.164b) et les compte-rendus des fouilles publiés à la fin du XIXème siècle.

Du fait de cette solution non satisfaisante, ils proposaient de réexaminer les textes relatant le déroulement des fouilles anciennes afin d'y trouver d'éventuels éléments d'explication (Bossuet & Thivet, 2007).

3.3.9.3 Nouvelles propositions de restitution du plan du sanctuaire

A partir des résultats livrés par la prospection LiDAR et leur confrontation avec les autres données, de nouvelles hypothèses sur la restitution du plan de cet édifice monumental ont pu être formulées.

3.3.9.3.1 Géoréférencement des plans anciens

A la lecture des comptes rendus de Duvernoy, (Duvernoy, 1883), il apparait très difficile de localiser précisément les zones fouillées en 1882 et 1883. Il semble tout de même qu'après un sondage effectué côté ouest révélant un *propylon** , les fouilles aient commencé coté est en se dirigeant de l'extérieur de l'enceinte vers le bâtiment central. Les propriétaires des terrains concernés, persuadés d'avoir des trésors cachés dans leur champ se montrèrent peu coopératifs, empêchant ainsi une fouille plus complète de l'édifice.

Parmi les nombreuses observations consignées par Duvernoy (annexe D), on en retiendra deux très importantes dans la perspective de la restitution du plan de l'édifice :

- la première précise : « *…l'axe de l'enceinte, d'un portail à l'autre, ne répond pas exactement à l'axe du monument incliné de quelques mètres vers le nord* »

- la seconde : « *…le portique qui faisait face au théâtre a complètement disparu et nous n'en avons eu connaissance que par le récit des habitants* » (Duvernoy, 1883).

Cette dernière observation confirme que le *propylon* côté est a été restitué sur le plan par symétrie architecturale.

Pour localiser au plus près l'ensemble des constructions, connaître leurs dimensions et permettre des comparaisons avec les données de prospection, nous avons redressé la portion du plan Morel-Barbier de 1895 correspondant au sanctuaire en choisissant comme points de repères les limites parcellaires des lieux-dits du plan cadastral napoléonien de 1836. En dépit de l'utilisation de 28 points de repères et d'une transformation mathématique polynômiale de troisième ordre, il est vite apparu que le redressement du fond de plan de 1895 ne serait pas tout à fait juste. Il a donc fallu faire un « compromis » entre un respect strict des dimensions de l'architecture de l'édifice et un ajustement parfait au tracé des limites parcellaires du cadastre ancien (fig. 167). Le report en noir des dimensions effectives du péribole issues du plan de 1883 (117,8 m par 110,7 m) se superpose au tracé du péribole nouvellement redressé.

3.3.9.3.2 Apports de la prospection LiDAR et de l'orthophotographie de 2009

La visualisation de la carte des pentes à partir des données LiDAR met en évidence, sous le bois, trois élévations parallèles qui sont interprétées comme les lambeaux de murs de la façade nord du bâtiment central (fig. 168).

Ces trois tronçons de murs, orientés est-ouest forment les vestiges d'un double portique (porticus *duplex*) dont le retour vers le sud est seulement attesté par un tronçon du mur médian (2). Ces murs sont distants les uns des autres d'environ 3 m, ce qui correspond aux indications données par Clément Duvernoy dans ces comptes rendus de fouilles (Duvernoy, 1883).

L'apparition d'une partie des murs de la façade sud sur l'orthophotographie de 2009 a permis de recaler plus précisément la cartographie électrique qui était légèrement décalée vers le sud (fig. 169).

L'amélioration du contraste de l'orthophotographie révèle juste au sud du bois, les anomalies phytographiques des murs internes et externes de la façade sud ainsi que leur retour vers le nord. Le traçé du mur médian n'est pas visible. Par contre, la quasi-totalité de l'espace de circulation (AC) et des tronçons de voies aboutissant au sanctuaire (V25 et V27) sont aisément reconnaissables.

3.3.9.3.3 Restitution du plan du bâtiment central

L'emplacement du *Porticus duplex* nord peut être restitué grâce à la prospection LiDAR et celui du *Porticus duplex* sud grâce à la prospection électrique, elle même recalée à partir de l'orthophotographie de 2009. Ces deux portiques définissent alors le périmètre d'un bâtiment central de 63 m de long et de 55 m de large, allongé suivant une direction est-ouest (fig. 170). La détection d'un mur supplémentaire sur la façade sud explique que les dimensions des façades est et ouest dépassent d'environ 2,5 m celles figurées sur le plan de 1883 (52,7 m). Les façades nord et sud sont en revanche de dimensions légèrement inférieures, (1,80 m par rapport aux 64,80 m sur le plan de 1883). Cette différence s'explique par la difficulté des fouilleurs de la fin du XIXème à reconnaitre précisément la structuration de la façade est et le retour de ses murs. Cependant, l'existence d'un système d'escalier permettant d'accéder au podium* par le milieu de la façade orientale est bien réelle comme le suggère le perron bétonné et dallé découvert à cet endroit lors des fouilles anciennes.

La détection « in situ » de ces éléments architecturaux permet de restituer, pour le grand sanctuaire de Mandeure, le plan d'un bâtiment central très comparable à celui du sanctuaire *d'Augusta Raurica*, en Suisse (Trunk 1994).

3.3.9.3.4 Restitution du péribole et de l'espace de circulation

Apports des méthodes de prospection

Nous avons complété la restitution architecturale du plan du sanctuaire en nous intéressant ensuite au péribole mentionné par Duvernoy (Duvernoy, 1883) et à l'espace de circulation découvert par la prospection électrique de 2007 (Bossuet et Thivet, 2007).

La carte de résistivité électrique du sous sol obtenue avec le dispositif à 1 m (fig. 171) révèle les murs de la façade sud du bâtiment central (1), le propylon ouest, (2), de même dimension que celui décrit par Duvernoy (18 m) et un tronçon rectiligne de la grande enceinte qui ferme sur trois cotés l'espace cultuel, (3), avec probablement une porte située à l'emplacement de l'anomalie résistante (3.a). L'espace de circulation à pans coupés (4) n'est pas visible sur tout le pourtour du péribole. Le sanctuaire semble être desservi par différentes voies (5) dont l'une passe par la porte aménagée dans l'enceinte de l'espace cultuel. La trace discontinue du péribole ne s'observe qu'en trois endroits : au sud du propylon (2), au sud du bâtiment central (6) et au nord-est (7) de celui-ci où il n'apparait non plus comme une anomalie résistante mais plutôt comme un fossé d'épierrement (anomalie conductrice).

L'orthophotographie (fig. 172) révèle seulement la trace de l'aire de circulation ; elle est principalement reconnaissable dans la partie ouest de son tracé. Par contre, l'enceinte cultuelle ainsi que le propylon et le péribole n'apparaissent pas sur ces clichés.

Les données microtopographiques issues de la prospection LiDAR permettent de visualiser une partie de l'espace de circulation (fig. 173), principalement celle de la zone sud qui échappait à nos différentes prospections.

3.3.9.3.5 Synthèse des informations

En sommant les différents schémas d'interprétation, il est possible de restituer la quasi-totalité du tracé de l'espace de circulation. Sa forme décagonale à pans coupés, assimilable à un polygone régulier de dix cotés est d'une largeur de 10 m environ. Entre cet espace de circulation et le bâtiment central ne subsisteraient plus que les vestiges du propylon ouest ainsi que quelques lambeaux du péribole sub circulaire (fig. 174a).

Si le péribole fonctionne avec l'espace de circulation, la position du propylône est doit alors se situer sur un axe (A1) reliant l'angle noté (2) à son vis-à-vis : l'angle (1).

Pour restituer la position du péribole, les dimensions du plan de 1883 (110,7 x 118 m) ont été utilisées pour générer une ellipse de mêmes dimensions qui a été superposée aux tronçons du péribole reconnus par nos prospections. L'intersection entre le sommet de l'ellipse et l'axe A1 détermine l'emplacement exact du propylône est.

Ainsi les propylées s'alignent sur l'axe (A1) qui est décalé de 6° par rapport à l'axe est-ouest du bâtiment central (A2).

Sur le plan de 1882, le nord est décalé de 18,5° vers l'ouest (fig. 164b) par rapport à l'axe du sanctuaire. Il n'est pas possible de faire correspondre les structures si l'on se contente d'une simple rotation de 18,5° afin de faire se superposer le nord du plan et le nord géographique, ce qui implique que le nord figuré est en fait le nord magnétique.

Pour référencer le plan par rapport au nord géographique, il nous faut corriger son orientation en prenant en compte la déclinaison magnétique (angle entre le nord magnétique et le nord géographique) de 1882 calculée pour la position de Mandeure soit 13° ouest.

En soustrayant cette valeur de 13° vers l'ouest on obtient alors une différence de seulement de 5,5° vers l'ouest entre le nord du plan de 1883 et le nord géographique. Cet angle est égal au décalage (A1) entre l'axe des propylées et l'axe est-ouest, ce qui sous-entend que l'orientation du péribole sur le plan est correct mais pas celle du bâtiment central.

A cette étape de notre développement, nous pouvons affirmer que le temple et l'enceinte du grand sanctuaire ont été implantés suivant deux directions : respectivement est-ouest (90°) et ENE/OSO (96°).

Cette particularité apparaît en filigrane dans le compte-rendu de Clément Duvernoy qui précise que : « *…l'axe de l'enceinte, d'un portail à l'autre, ne répond pas exactement à l'axe du monument incliné de quelques mètres vers le nord* » (Duvernoy, 1883). Toutefois, cette observation de fouille n'est pas retranscrite sur le plan d'Henri L'Epée où la direction de l'axe du péribole est identique à celle du bâtiment central et non oblique comme le sous-entend le terme « incliné » employé vraisemblablement à dessein par Duvernoy.

Cette constatation conduit à penser que le relevé d'Henri L'Epée est peut être un relevé architectural en partie normalisé dans la mesure où il restitue une implantation des structures suivant une seule et même direction.

3.3.9.4 Conclusion

3.3.9.4.1 Restitution du plan du sanctuaire

En conclusion, l'étude de la microtopographie LiDAR a permis de remettre en perspective les données géophysiques et les plans anciens. Sur la base de la découverte de l'emplacement du mur externe sur la façade nord.

La restitution du sanctuaire effectuée en collaboration avec Séverine Blin, responsable d'opération dans le PCR Mandeure indique un bâtiment central d'orientation est-ouest, mesurant 55 m nord-sud sur 63. Il est composé d'un *porticus duplex** sur ses quatre cotés avec un système de marche pour accéder au podium coté est (fig. 174b). Le plan du temple en lui-même, mesurant 16 m sur 27, a pu être restitué à partir des dessins de contreforts et d'un *antéridès* figurés sur le plan de 1895 (Blin, à paraître).

Le péribole est un ovoïde, décalé de 6° par rapport à l'axe du bâtiment central. Il mesure 110,7 m sur 117,8 m et est garni de deux *propylé*s de 18 m de large saillant légèrement de la circonférence du péribole. Ce dernier est bordé par un espace de circulation formant un décagone d'une largeur moyenne d'environ 10 m. Cet espace de circulation est desservi coté est par au moins deux voies. Le prolongement de la plus ancienne (V25a) aboutit au centre de la façade est et l'autre, V25b rejoindrait probablement le propylône est après une inflexion de son tracé en contrebas de la plateforme supportant le sanctuaire. A l'ouest, la voie V27 franchit une porte au niveau de l'enceinte de l'espace cultuel puis de divise en deux tronçons. V27a se poursuit en ligne droite vers l'espace de circulation alors que V27b s'infléchit vers le sud pour rejoindre le propylône ouest.

3.3.9.4.2 Eléments de chronologie

Les fouilles anciennes et l'étude du mobilier ont montré que ce sanctuaire possédait un antécédent laténien (Barral, 2007). C'est également le cas du sanctuaire du « Champs des Fougères », reconnues en 2003, qui présente avec lui des analogies morphologiques et topographiques (Bossuet *et al.*, 2003). La fouille du sanctuaire du « Champs des Fougères » a identifié six phases d'occupation distinctes entre la Tène et la période Flavienne (Nouvel & Thivet, 2009).

La restitution du plan du grand sanctuaire et de son environnement montre qu'il amalgame des structures dont la construction ou le fonctionnement sont d'époques différentes. Il s'agit notamment de la structure orientée à 45° détectée sous le bâtiment central (fig. 174), des voies d'accès dont une partie ont pu être reconnu dans la tranchée géoarchéologique de 2003 (cf. partie 4), du péribole et du bâtiment central dont la différence d'orientation illustre leur non contemporanéité.

3.3.9.4.3 La perception du sanctuaire dans le paysage actuel

La figure 175 révèle que le modelé du terrain est en grande partie déterminé par l'enceinte du sanctuaire et son espace de circulation. Son tracé circulaire imprime sa marque dans le découpage parcellaire que l'on observe sur le cadastre ancien au lieu-dit « Les Courbières». Le report de la position des murgers à la fin XIXème siècle montre que l'un d'entre eux se superpose parfaitement au double portique nord. L'espace délimité par les deux murgers, correspond aujourd'hui à l'emprise du bois (hachures grisées) sous lequel la moitié nord du bâtiment central est encore enfouie.

Il est important de rappeler qu'il existe dans l'agglomération antique d'autres exemples de pérennisation d'ensembles monumentaux dans la morphologie du cadastre ancien. Le cas de la fortification du Bas Empire (*Castrum*) déjà évoqué, dont le tracé du fossé d'enceinte se confond en grande partie avec la forme circulaire du parcellaire peut être signalé. Un autre cas démonstratif se rencontre à l'extrémité est de l'agglomération antique, au lieu dit « Courcelles », où l'agencement des parcelles invite à identifier l'empreinte d'un édifice de plan rectangulaire inscrit dans une enceinte circulaire, localisé au point de convergence de deux voies antiques, au débouché d'un axe en provenance d'Augst (Thivet *et al.*, 2009)

3.4 Conclusion

L'étude et la comparaison des résultats des différentes prospections ont apporté de nombreuses informations sur les sites présentés. La combinaison de différentes prospections a permis de mettre en place des solutions innovantes pour l'étude de deux types de sites localisés en contexte boisé :

- utilisation des données LiDAR pour spatialiser et détecter les structures ainsi que pour replacer ces dernières dans leur cadre géographique

- caractérisation de la morphologie et de la nature de la structure dans son environnement sédimentaire grâce aux prospections géophysiques

- prélèvement de mobilier ou de sédiment soit pour dater les structures reconnues et/ou pour caractériser leurs environnements anciens

Grâce aux prospections effectuées sur sol nu ou en prairie, nous avons pu préciser la connaissance des structures et/ou la datation de sites auparavant connus. Les résultats des prospections menées sur l'agglomération antique de Mandeure sont nombreux. Cette zone avait été abondamment prospectée avant 2008 et la reprise de toutes les données de prospection à la faveur de l'acquisition LiDAR et de nouvelles prospections géophysique ont permis de répondre à certains questionnements et en poser de nouveaux.

L'importance, la structuration et la fonction du quartier artisanal de « l'Essarté » ont été revues. L'occupation antique, aussi bien en rive gauche qu'en rive droite est mieux connue et le tissu urbain apparaît moins dense dans certains secteurs comme par exemple celui des « Combolles », viabilisé mais très peu loti. Enfin, l'étude des données microtopographiques a permis de reprendre sous un nouvel angle des notes de fouilles anciennes et de proposer un nouveau plan du grand sanctuaire des « Cloux du Château », plus en accord avec les découvertes anciennes et les prospections actuelles. Ce plan, aux axes de construction d'orientations différentes, pose de nouvelles questions sur la chronologie de l'édification des différentes parties du monument et sur les relations entre ce grand sanctuaire et les autres édifices monumentaux inclus dans le grand complexe cultuel.

Ce sont au total une vingtaine de sites qui ont été étudiés dans cette partie. Il est évident qu'à première vue, la combinaison des différentes méthodes de prospection fournit un plus grand nombre d'informations. Toutefois, il est nécessaire de dépasser le postulat qui consisterait à considérer que la multiplication des prospections apporterait automatiquement un plus grand nombre d'informations utiles, pour se pencher plus en détail sur les apports spécifiques de ces prospections suivant différentes conditions environnementales.

Le fait d'avoir structuré cette partie en trois chapitres suivant la nature de la couverture du sol semblait la plus logique car il se basait sur un choix de contraintes aisément définissables : impossibilité de recourir aux photographies aériennes, action des pratiques agricoles modernes etc.. Mais, on pouvait s'en douter, les conditions taphonomiques et environnementales diverses entrainent des variations dans l'efficience des prospections pour des mêmes types de couverture du sol.

La figure 177 présente le classement des résultats obtenus pour chaque site par chaque méthode de prospection utilisée. Dans ce classement, les cases vides indiquent que la méthode de prospection n'a pas été utilisée et la valeur « 0 » correspond à une absence de résultat. L'indice d'efficacité de la détection (structure ou objet) par les différentes méthodes de prospections est indiqué par des symboles allant de (-) pour des résultats mitigés à (++) pour, à notre avis, les résultats les plus satisfaisants.

Sous couvert boisé, l'apport des photographies aériennes est bien évidemment très limité dans le cas de recherches de traces matérielles d'occupation. Les deux exemples présentés (Forêt de Chailluz et mardelles de Lorraine) montrent une vraie complémentarité des méthodes. La géophysique affinant la vision plus extensive mais moins complexe, dans le bon sens du terme, du LiDAR. Cependant, la difficulté d'acquisition des données contraint l'application de la prospection géophysique à de petites surfaces. Ce couvert limite, à cause des feuilles, des arbustes et des débris végétaux en général, la reconnaissance à vue à celle des plus grosses structures. Le repérage des concentrations de mobilier étant faisable au prix d'un long investissement et d'une équipe conséquente de prospecteurs (Thuillier, 2004).

Les prospections en zones ouvertes conviennent à toutes les méthodes, comme attendu. C'est le type de surface ou toutes les méthodes ont une lisibilité maximale. La prospection LiDAR souffre toutefois de l'atténuation des reliefs due à l'érosion provoquée par les travaux agricoles modernes sauf sur les sites de « Chamabon » et de « Châtillon », protégés par la mise en pâture. Les résultats du LiDAR sur les autres sites localisés dans ce type de milieu, apparaissent limités, sauf cas exceptionnel, à la découverte des structures les plus imposantes et à la cartographie des parcellaires anciens (comme c'est le cas, par exemple, sur le plateau en arrière du théâtre). Ce constat amène à se poser la question de l'intérêt archéologique et de la pertinence d'employer la méthode LiDAR pour prospecter des grandes zones de plaine cultivée. Si nous avons pu, dans certains cas, identifier et interpréter des traces archéologiques très ténues (d'ordre centimétrique), par exemple la trame viaire du secteur des « Combolles », c'est grâce à la confrontation avec de nombreuses données de prospection et à l'application de traitements numériques appropriés. Ce type de résultat reste toutefois assez rare et, dans tous les cas, une approche prospective basée sur la seule méthode LiDAR n'aurait pas permis d'emblée de déceler les anomalies microtopographiques trahissant ces aménagements antiques. Ces faibles amplitudes du signal, interprétables sur un sol nu, seraient assimilables au bruit de fond sur un sol forestier, généralement beaucoup plus tourmenté.

Il apparaît donc que les bénéfices de la prospection LiDAR sont soumis à la fois à la manière d'envisager l'exploitation des résultats, la nature de la couverture du sol mais aussi au nombre d'informations disponibles sur le site.

Pour profiter pleinement du caractère très extensif de la plupart des méthodes de prospection, il est nécessaire de prendre de la hauteur et de travailler à plus grande échelle. Toutefois, principalement dans le cas des prospections LiDAR, le nombre d'anomalies visibles sur chaque image est très important et il est quasiment impossible de pointer toutes les irrégularités du microrelief sur une surface aussi étendue. De plus, cette prospection ne nous donne qu'une image instantanée d'une très

grande surface de sol, où se mêlent et se chevauchent de multiples traces d'origine bien différente (voirie, exploitation du territoire, formes géologiques etc.). Cet « empilement » de traces rend difficile l'appréhension de toutes les anomalies du microrelief sans recherches thématiques.

Quatrième partie

Restitution de dynamiques naturelles et anthropiques – étude de cas

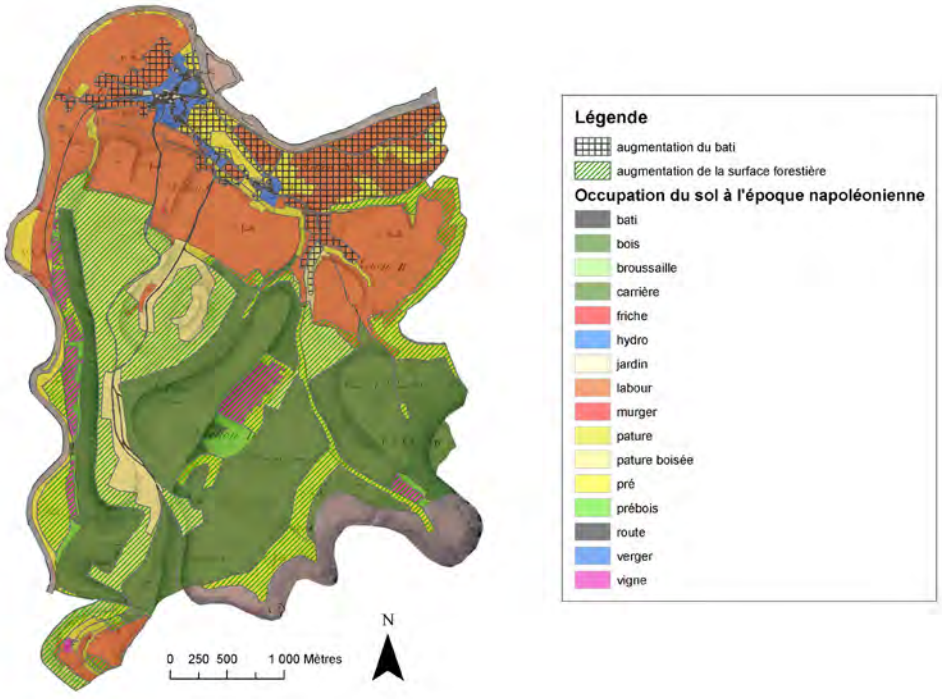


Illustration de la couverture de la quatrième partie :

Evolution de l'utilisation du sol entre le XIXème et le XXIème siècle sur le territoire de la commune de Mandeure (C. Laplaige, 2011)

4. Restitution de dynamiques naturelles et anthropiques – étude de cas

Cette quatrième partie s'intéresse à l'étude des dynamiques anthropiques et naturelles et concerne plus particulièrement, dans le Projet Collectif de Recherche sur l'agglomération antique, l'axe 1 de ce programme consacré au « pôle de Mandeure et à son contexte micro-régional ». Cet axe recouvre deux domaines clés des recherches en cours sur le secteur de Mandeure, d'une part le fonctionnement de la plaine alluviale du Doubs au cours de l'Holocène, d'autre part la détection des gisements archéologiques et traces d'occupation humaine sur sol nu et en milieu forestier.

Ces recherches se déclinent suivant différentes thématiques relatives à l'organisation de l'espace urbain, aux formes et aux rythmes de l'occupation rurale, à la dynamique du peuplement et à l'évolution du milieu naturel dans la longue durée. Ces thématiques ne peuvent s'appréhender seules et sont dans la plupart des cas interdépendantes. A la différence des exemples d'application traités dans la troisième partie, le travail a porté cette fois sur une échelle d'investigation spatiale beaucoup plus large utilisant des méthodes mises en œuvre non pas dans l'optique d'en comparer les avantages respectifs mais dans celle de répondre à des questionnements précis rattachés aux différentes thématiques de recherche développées dans le cadre du PCR.

C'est ainsi qu'il est proposé de traiter des dynamiques anthropiques et naturelles au travers de cinq problématiques intéressant successivement :

- la reconnaissance des formations alluviales quaternaires et des écoulements anciens

- l'étude de l'évolution du couvert végétal et l'impact de l'homme sur le milieu durant la période holocène

- la reconnaissance et la caractérisation des sites fortifiés dans le pays de Montbéliard

- la restitution de la trame viaire antique ainsi que son intégration dans les grands axes de communication de l'est de la Gaule

- la reconnaissance des traces matérielles d'exploitation du milieu forestier (fours à chaux* et places de charbonnier) durant l'époque moderne.

4.1 Reconnaissance des formations alluviales quaternaires et des écoulements anciens

Dès 1986, Yves Jeannin supposait que la discontinuité observée dans le tissu urbain antique de la ville d'*Epomanduodurum* était à mettre en relation avec un ancien cours du Doubs, passant vers l'est, au pied de la colline du théâtre et recoupant le méandre. Peut-être actif aux époques protohistoriques, ce diverticule aurait été marécageux à l'époque gallo-romaine et remis en eau lors des crues importantes de la rivière, d'où la quasi absence de constructions jalonnant son tracé. Encore aujourd'hui, les inondations ennoient régulièrement une partie de l'assiette où sont implantés les vestiges relatifs aux différentes phases de construction de l'agglomération antique (fig. 178).

L'une des problématiques du PCR Mandeure concerne l'étude de la part des facteurs naturels dans l'organisation et le développement de l'agglomération antique. Le fonctionnement de la plaine alluviale du Doubs a été étudié grâce à différentes méthodes d'investigation complémentaires dont notamment les prospections géophysiques à finalité géo-archéologique et la carto/photo-interprétation. Leur mise en œuvre a permis de restituer sur plus de 80 ha le tracé des réseaux hydrographiques anciens dans la plaine alluviale du Doubs où s'insère l'agglomération antique de Mandeure. Parallèlement, l'approche chronologique des remplissages des chenaux fossiles (par analyse stratigraphique et datation radiocarbone des séquences observées) a fourni des informations essentielles sur la dynamique naturelle du Doubs et sur l'évolution des relations homme milieu.

C'est donc dans cet axe de recherche et dans la continuité des travaux menés antérieurement que nous avons tenté d'approfondir les connaissances sur le fonctionnement de la plaine alluviale du Doubs. Pour cela, nous avons étendu la reconnaissance de la paléo hydrographie à de nouveaux secteurs, et essayé également d'apporter de nouveaux éléments sur les zones précédemment étudiées (Pallier, 2001 ; Bossuet *et al.*, 2002, 2003, 2004, 2005 ; Bossuet & Thivet, 2006, 2007 ; Thivet, 2008). Nos investigations se sont étendues jusqu'à la commune de Pont de Roide en aval, là où des traces d'aménagements de grande ampleur (drains, fossés, bassins) en rapport avec l'hydraulique avaient été repérées, en amont jusqu'à la commune de Valentigney.

4.1.1 Cartographie des terrasses alluviales

La carte géologique dans le secteur de Mandeure a été dressée en 1973. De nouvelles données ont été ajoutées à la fin des années 70 par M. Campy et A. Thévenin (Campy & Thévenin, 1978) qui redéfinissaient la cartographie des terrasses alluviales, et notamment de la basse terrasse du Doubs, de Villars-sous-Dampjoux jusqu'à Mandeure à l'aide de trois coupes sériées dont les deux dernières se situaient dans notre zone d'étude (fig. 179a). Cette figure 179a, représente l'extension des alluvions de la terrasse Fy datées du Würm final et celle des alluvions holocènes de la terrasse Fz. La partie élargie de la plaine alluviale mesure un peu plus de 5,5 km de longueur dans la direction de l'écoulement méridien du Doubs, et de 500 à 1500 m de largeur dans la direction est-ouest. Dans cet espace, la terrasse Fy occupe la plus grande partie de la rive gauche du Doubs qui s'écoule en une succession de méandres le long du versant est de la vallée. Cette terrasse se retrouve également sur le territoire de la ville de Mandeure, en rive droite, où elle longe pendant un peu moins de 2 km le plateau calcaire

suivant une orientation nord-sud, des « Isles devant Mathay» jusqu'au cœur de l'agglomération antique. L'intérieur de la boucle est recouvert en grande partie par cette même terrasse Fy. Deux petits lambeaux de cette formation subsistent tout au sud de la zone d'étude, sur les territoires des communes de Bourguignon et de Pont-de-Roide, à la fois en rive gauche et en rive droite. Le reste du fond de vallée est occupé par les terrasses Fz.

Une nouvelle cartographie des terrasses alluviales a été proposée à partir du MNT généré par l'analyse par « bandelette » (fig. 55). Le résultat est présenté figure 179b.

L'extension de la terrasse Fy a été supprimée du lieu-dit « Les Huppes » jusqu'à celui des « Combolles » (1), l'altitude moyenne de cette zone ne dépasse pas 1,5 à 3 m par rapport au cours du Doubs. Cette modification est par ailleurs plus en adéquation avec les résultats de sondages électriques et des sondages carottés effectués dans ce secteur des « Combolles » préalablement au projet de déviation routière de Mathay (Bossuet *et al.*, 2005). En rive droite, la terrasse Fz a été étendue jusqu'au lieu-dit des « Ouchottes » (2) en prenant en compte là aussi les données altimétriques et les résultats des sondages mécaniques effectués en 2001 dans ce secteur (Bossuet *et al.*, 2001).

Plus au sud, en rive gauche, le contact entre les formations Fy/Fx a été redessiné (3) sur la base des seules données altimétriques, les sondages du BRGM étant peu nombreux et peu informatifs dans cette zone. Enfin, tout au sud de la zone d'étude, le tracé du contour de la terrasse Fy a lui aussi été revu (4) sur les mêmes bases.

Il est par contre beaucoup plus difficile de se prononcer sur l'extension des terrasses à l'est de la ville de Mandeure, et au-delà, en direction de la ville de Valentigney du fait notamment d'une urbanisation moderne très dense qui perturbe fortement la lecture du modelé du terrain et la qualité des observations.

4.1.2 Cartographie des paléochenaux.

Une cartographie quasi exhaustive des écoulements anciens et récents du Doubs a pu être dressée dans ce secteur en combinant l'altimétrie à très haute résolution des terrains, la photo-interprétation, les sondages mécaniques et les prospections électromagnétiques.

4.1.2.1 Le modèle numérique de terrain

Le modèle numérique de terrain à très haute résolution restitue les variations d'altitude jusqu'à un ordre de grandeur décimétrique. Dans différents secteurs de la plaine alluviale, la cartographie de ces variations dessine alors, de façon plus ou moins continue, des dépressions sinueuses caractéristiques de paléoformes fluviales. L'intrication et le recoupement d'une partie de ces écoulements anciens attestent de leur appartenance à des réseaux hydrographiques chronologiquement distincts (fig. 180).

Par exemple, le groupe de paléochenaux de la zone 2 se repère sur un replat intermédiaire de la terrasse Fy sous la forme d'anomalies sinueuses en creux. Plus au nord, malgré les perturbations liées aux constructions (voirie, habitations modernes), on observe deux groupes importants de chenaux, C1 et C2, qui se réalimentent en eau en période de crue (Bossuet et Thivet, 2006). Le groupe de chenaux C1 entaille la vallée d'est en ouest en longeant la terrasse Fy avant de se heurter à un banc

calcaire pour se rediriger vers le nord-est. Le chenal le plus important traverse « Faubourg de Pont » et les « Combolles » avant de retrouver le cours actuel du Doubs au niveau de la station de pompage. Plusieurs diverticules de C1 semblent identifiables dans la microtopographie. Ils sont recoupés par le Doubs à plusieurs endroits, aux « Ouchottes » et aux « Combottes » et donnent ainsi probablement naissance au groupe de chenaux C2. Ce groupe situé en rive droite traverse l'intérieur de la boucle en direction du nord-est pour rejoindre le cours actuel du Doubs aux « Prés sur la Cure ». Cette chenalisation isole une zone de plus haute altitude (3) sur laquelle se sont développés les quartiers antiques des « Combolles » et de « Champs Pelletier » (Cf. partie 3).

Un dernier groupe d'anciens chenaux (C3) d'orientation quasi parallèle au cours actuel du Doubs s'étend en rive droite quasiment jusqu'au pied du plateau du Lomont. Entre C2 et C3 subsiste une zone de plus haute altitude, elle correspond à l'emprise de la terrasse Fy sur laquelle s'implante le cœur du village. Le modelé de cette terrasse présente à l'est une morphologie clairement façonnée par l'érosion fluviale. La restitution de l'occupation du sol faite à partir du dépouillement du cadastre ancien révèle que cette zone cultivée en prairie concentre bon nombre des microtoponymes évocateurs de milieux humides et marécageux en association avec des formes parcellaires courbes déterminées par les sinuosités des cours anciens de la rivière (Thivet *et al.*, 2009).

D'une manière générale de nombreux autres chenaux de moindre importance sont identifiables en plusieurs zones très inondées de la vallée en période de crues. Citons tout particulièrement le chevelu hydrographique révélé en rive gauche du Doubs (4) et le tracé d'anciens méandres reconnu aux « Ouchottes » (5) près du théâtre antique (Bossuet *et al.*, 2001).

4.1.2.2 La conductivité électrique du sol

A partir de 2001 et jusqu'à 2010, la cartographie de la conductivité électrique du sol a fourni, à chaque étape de sa réalisation, une image de plus en plus complète et détaillée du réseau hydrographique ancien.

Sur l'assemblage des différentes cartes qui correspond à une profondeur exploration du sol de 5 m, il convient de séparer l'espace prospecté (131 ha) en 2 zones (fig. 181).

La zone Sud révèle des valeurs de conductivité variant de 5 à 50 mS/m selon une échelle de couleurs variant du noir au blanc en passant par le rouge et le bleu. L'acquisition des données a été effectuée durant une seule semaine en avril 2010, dans des conditions de mesure stables c'est-à-dire comparables d'un secteur prospecté à l'autre (teneur en eau, toit de la nappe). Les valeurs se distribuent de façon plutôt homogène, il n'a donc pas été nécessaire dans ce court laps de temps d'ajuster les différentes prospections les unes par rapport aux autres.

A l'inverse l'acquisition des données de la zone nord s'est échelonnée dans le temps, entre les années 2001 et 2007, et à différentes saisons tout au long de l'année. Les conditions de mesure (humidité et température) ont considérablement varié entre chaque prospection, il a donc été nécessaire d'ajuster les valeurs afin d'assurer une continuité dans la cartographie du contour des différents corps sédimentaires. Pour ce faire, nous avons ajusté les médianes mais surtout les écarts types de chaque

prospection. L'échelle de conductivité ne possède donc pas de valeur absolue, mais à titre indicatif, on retiendra que 95% des valeurs mesurées se distribuent entre 2 et 30 mS/m, ce qui correspond à ce que l'on observe pour la zone sud, où les plages de conductivité les plus cartographiées (palette de couleurs du noir au blanc) correspondent à une dynamique du signal tout à fait comparable (2-30 mS/m).

Sur l'ensemble de la zone, les paléochenaux, comblés dans des proportions variables de matériaux fins (limons, argile) et d'autres plus grossiers, se manifestent généralement sous la forme d'anomalies toujours plus conductrices que la grave fluviatile qui constitue un encaissant électriquement plus résistant (cf. partie 3).

La majorité des prospections ont été interprétées dans la troisième partie, seuls les acquis principaux de cette exploration sont rappelés ici.

- Tout d'abord, nous avons pu mettre en évidence l'existence de deux styles fluviaux, méandre et tresse, localisés dans deux zones distinctes du tronçon élargi de plaine alluviale (Gilvear et Bravard, 1993).

- En amont, dans une zone s'étendant de Bourguignon jusqu'au nord de Mathay (« Les Huppes »), la plaine alluviale est principalement occupée par les dépôts de la terrasse Fy où prédominent les traces de chenaux multiples (tresse) dont la largeur n'excède jamais les 50 m. La morphologie de cette terrasse Fy montre l'existence de plusieurs ressauts parfaitement identifiables sur le MNT LiDAR (Campy et Thévenin 1978). Les traces d'incision de chenaux multiples (1) et (2) repérées à sa surface attestent que cet épanchement fluviatile a bien été entaillé plusieurs fois par des érosions mineures.

- En aval, du nord de Mathay « Les Huppes » jusqu'à l'est de Mandeure, la plaine alluviale est recouverte principalement par les alluvions holocènes où prédomine le méandrage avec de nombreuses traces de la migration latérale de ces anciens chenaux dont la largeur, supérieure à 50 m, est comparable à celle du Doubs actuel.

- Aux « Ouchottes » (5) la prospection électromagnétique permet de différencier une série de chenaux formant au moins un banc. De plus de nombreux chenaux secondaires apparaissent dans l'espace cultuel principalement autour du sanctuaire des « Cloux du Château ». On peut aussi observer de nombreux chenaux trahissant la migration du cours du Doubs vers le nord au niveau des « Champs Pelletier » (6).

4.1.3 La relation entre la ville antique et le Doubs

Les relations entre la rivière et l'agglomération antique ont été traitées longuement dans les différents PCR et dans la thèse de Matthieu Thivet (Bossuet *et al.*, 2001-2005 ; Bossuet & Thivet 2006, 2007 ; Thivet 2008). Ces recherches ont montré que la ville a souvent été soumise aux aléas fluviaux, se traduisant par exemple par les surrections successives des niveaux de sols du quartier artisanal de

« Faubourg de Pont » ou l'interstratification, dans les couches d'occupation, de remblais et de dépôts de crue datés de 100 BC à 100 AD au lieu dit « les Montoilles » (Thivet, 2008).

Afin d'étudier la chronologie de mise en place de ce réseau hydrographique et la durée de son fonctionnement, deux coupes géomorphologiques perpendiculaires à la vallée ont été creusées à la pelle mécanique entre le théâtre le sanctuaire des « Cloux du Château » (fig. 182) en 2002 et 2003. La première coupe, située entre le théâtre et la route, mesure 80 m de long, 2 m de large et est profonde d'environ 2 m. La seconde, située entre la route et le sanctuaire des « Cloux du Château », est longue de 75 m, large de 1 m et profonde de 1,5 m.

4.1.3.1 Dynamique alluviale et anthropique devant le théâtre depuis l'âge du Fer.

La dynamique alluviale depuis le début de l'holocène a été traitée dans la thèse de Matthieu Thivet, nous nous contenterons de travailler sur les périodes protohistoriques et antiques. Les datations radiocarbone, obtenues sur les échantillons prélevés dans les couches recoupées par la tranchée de 2002, permettent de replacer l'accumulation sédimentaire à partir de 9000 cal BP (prélèvement S2 figure 183), ce qui laisse supposer un creusement du chenal au début de l'holocène.

Sur cette figure, le dépôt noté (3) définit un mince lit de graviers, plus ou moins continu et tabulaire; il semble se rattacher au niveau d'ouverture d'une fosse (F1) d'un peu plus d'un mètre en section contenant plusieurs blocs de pierres. Il s'agit à première vue d'un niveau d'occupation. La datation effectuée au sommet du dépôt (4) et l'absence d'artefacts gallo-romains indiquent que ce niveau d'occupation pourrait être contemporain du premier Age du Fer. Ce niveau a pu être repéré dans d'autres endroits de la boucle du Doubs, notamment aux « Montoilles » et à la « Papeterie ».

Un niveau stratigraphique (2e), dont la texture présente les caractères d'un dépôt de limon de débordement lié aux apports réguliers de la rivière, recouvre la couche (4). Cependant, les nombreux fragments de pierres calcaires, observés dans sa partie occidentale ne peuvent être, dans ce contexte, d'origine naturelle. Il est probable que ces pierres, en position stratigraphique superficielle, correspondent à un apport postérieur au dépôt de la matrice limoneuse et génétiquement liées aux mêmes éléments inclus dans le niveau (2b).

Un ensemble formé par les niveaux (2b), (2c) et (2d), à matrice sédimentaire identique à celle du niveau (2e) et correspondant visiblement à une transformation post-dépositionnelle de ce dernier niveau est observé. Cette transformation apparaît liée à une anthropisation du milieu marquée à la fois par les apports de pierres, la présence de pavetons calcaires et d'enduit blanc dans les couches (2b) et (2c). L'emprise des vestiges de construction associés au niveau (2c) et celle du petit lit de graviers du niveau (2d) coïncide parfaitement avec l'anomalie magnétique détectée en avant du théâtre par la géophysique et recoupée transversalement par la tranchée, ce qui conduit à interpréter ces niveaux comme les restes d'une structure construite (fondation de mur arasée?).

On constatera que la limite ouest des couches (2b), (2c) et (2d) correspond à l'extension maximale dans cette direction du niveau (2b); celui-ci pourrait alors matérialiser l'emprise au sol d'un espace clos en relation structurelle avec l'un des états de construction du théâtre/amphithéâtre? ou avec des

aménagements qui lui sont liés. Aux dépôts sédimentaires précédents se surimpose une structure excavée (fosse F2) et un niveau d'accumulation sédimentaire très riche en gravillons et graviers (2a). Ces derniers dépôts remanient plusieurs fragments de tuiles gallo-romaines. Les éléments grossiers plaident en faveur d'une origine partiellement anthropique dans ce contexte (le site n'est plus, à cette période, le lit majeur de la rivière où est retrouvé généralement ce type d'apport grossier en grande quantité).

4.1.3.2 Eléments de la dynamique hydrologique holocène

De l'autre coté de la route, la seule datation radiocarbone disponible provient d'un échantillon prélevé au nord-est du sanctuaire dans une couche sableuse située à la base du comblement d'un chenal reconnu à l'extrémité nord-ouest de la coupe (34 fig. 184). Une fois calibrée, cette date fixe le début du comblement du chenal comme intervenant entre 9175 et 8736 cal. BC, soit au début de l'holocène, à l'instar de ce qui a été observé pour le remplissage du chenal courant face au théâtre antique.

De la base au sommet de la coupe, figure un complexe sablo-graveleux gris à galets et graviers (couche 19), il correspond à l'épandage fluviatile de la basse terrasse du Doubs (Fy). Au centre de la coupe, le toit de la grave calcaire, à morphologie tabulaire, pointe à la cote 334 m, sous plus d'1 m d'alluvions holocènes. De part et d'autre de cette zone, la morphologie du toit de la grave dessine le profil de deux incisions que comblent des faciès fluviatiles à granulométrie plus ou moins fine : dépôts argileux et limono-argileux (25, 21), dépôts sableux et sablo-graveleux (34, 26, 23) relatifs à des dépôts de berges et de fond de chenal. Leur mise en place correspond à un régime hydrologique plus ou moins fort de chenaux actifs.

Des dépôts à texture limoneuse (33, 27, 22) sont mis en place pendant les périodes d'inondation et les périodes d'étiages durant lesquelles se développe une pédogenèse (enrichissement en matière organique par rapport aux dépôts antérieurs et traces de perturbations racinaires). Cette phase d'évolution témoigne de la période d'abandon progressif des chenaux.

Un dépôt de limon argileux brun à lit de graviers (24), continu et tabulaire, marque le développement d'un paléosol. En l'absence de datation, par relation stratigraphique avec la coupe de 2002, il est possible d'affirmer que ce paléosol est celui daté de l'âge du Fer et repéré dans différents endroits de l'agglomération. Il semble se rattacher au niveau d'ouverture d'une fosse F3 d'1 m de section. Ce paléosol et les dépôts fluviatiles sous-jacents sont recoupés par deux fosses F2 et F4 et par deux collecteurs souterrains d'écoulement des eaux (COL) fondés dans la grave calcaire (fig. 184).

Une incision postérieure tronque au sud-est ce paléosol et les remplissages fluviatiles sous-jacents. La sédimentation de son comblement est formée de faciès fins, (argile et limons des niveaux 15, 16) et de faciès plus grossiers, (sables limoneux des niveaux 9, 10 11) qui expriment un certain calme et une régularité des écoulements.

Un dépôt sablo-graveleux à gros galets (7) à stratification légèrement inclinée vers l'est recouvre cette dernière incision. L'extension latérale de cette barre sablo-graveleuse se poursuit jusqu'à l'extrémité sud-est de la coupe. Ces dépôts grossiers de sables et graviers forment un ensemble homogène

correspondant à un accident granulométrique très localisé, sans aucun passage latéral de faciès avec les dépôts avoisinants. Leur mise en place correspond à des écoulements hydriques de très forte énergie. Cette rupture brutale dans la dynamique de l'accumulation sédimentaire de la plaine pourrait être en relation avec une modification importante du régime hydrologique (dépôt événementiel lié à une ou des crues très importantes de la rivière ?).

A la surface de ce dépôt (7), on observe plusieurs incisions secondaires, comblées à la base par un limon argileux (14) et par des sables limoneux (5b) dont les plus superficiels (5a) présentent des traces de perturbations racinaires liées à la pédogenèse supérieure.

Au dessus de cette couche, un niveau d'argile limoneuse brune (3), enrichi en matière organique (pédogenèse), auquel semble se rattacher l'ouverture de la fosse (F1), contient plusieurs pierres calcaires et la petite structure excavée (12), vestige probable d'un trou de poteau.

Enfin, un limon brun à graviers et galets (2) présente les caractères d'un limon de débordement et est lié à des apports réguliers de la rivière. Il est tronqué par un limon brun gris, dont l'extension latérale se poursuit jusqu'à l'extrémité nord-ouest de la coupe. Cette matrice limoneuse est constituée par des apports successifs de limons fins de débordement (2d, 2c, 2b, et 2a) et de limons plus sableux (28, 29, 30, 31) entrecoupés de plusieurs niveaux d'occupation érodés, installés postérieurement à la mise en place du paléosol (24).

Il est possible de visualiser plusieurs niveaux d'occupation qui sont matérialisés par des niveaux de matériaux de démolition (PTG1, PTG2, PTG3 et PTG4) incluant des fragments de pierres calcaires et de tuiles, mêlés à des graviers et des petits galets. Mais aussi par des niveaux d'empierrement (radier de pierres calcaires) apparaissant au contact du paléosol 24 (Rd4, Rd3) ou en position stratigraphique plus superficielle dans les niveaux alluvionnaires sus jacents (Rd2, Rd1). On observe aussi des niveaux de tuiles disposées à plat (NT1 et NT2), des niveaux de chaux blanche (NC1et NC2), des niveaux argilo-graveleux blanchâtre (NM1 et NM2) de type «macadam à l'eau», un niveau de mortier jaune décomposé (NMD), des niveaux de galets et graviers (G1 à G7) et enfin le niveau des labours actuels (1) qui remanient les limons de la plaine d'inondation.

4.1.3.3 Les niveaux d'occupation

Les niveaux d'empierrement (Rd3, Rd2 et Rd1 fig. 184) recouverts par des niveaux argilo-graveleux de type «macadam à l'eau» (NM1, NM2, NM3) et des couches de graviers (G3, G4) forment une succession de couches caractéristiques d'une section de voie avec une chaussée de graviers (recharge ?) édifiée sur un mortier et un radier de pierres. Ces vestiges matérialisent trois éléments de voirie, de largeur comprise entre 5 et 8 m, courant au nord et au sud de la tranchée. Leur position stratigraphique étagée suggère d'interpréter la voie 1 comme la plus ancienne, et la voie 3 comme la plus récente. Sur la carte de résistivité (fig. 182) la voie 3, la plus sommitale, apparaît bien. La voie 1 est visible au nord de la prospection mais sa trace s'atténue en se dirigeant vers le sud car la voie est recouverte par des dépôts conducteurs (limons) qui perturbent sa détection. La voie 2 est quant à elle invisible sur les

cartes de prospection électriques. En plus d'être recouverte par de dépôts limoneux, la conservation de cette voie est assez mauvaise du fait de la quasi disparition du radier de pierres (RD2).

L'installation de la voie V3 apparaît concomitante de celle des collecteurs souterrains (COL) auxquels elle est superposée. Ce collecteur a été recoupé par la tranchée à l'endroit ou celui-ci, issu du nord sous la voie V3, se divise en deux branches, l'une au sud-ouest, vers le sanctuaire des « Cloux du Château », l'autre au sud-est, vers les « Ouchottes ». Ce tronçon du collecteur est d'ailleurs visible sur la carte de résistivité électrique du sous-sol où il apparaît comme un linéament résistant (fig. 182).

Les niveaux de tuiles disposées à plat (NT, NT2 fig. 184) et les niveaux de chaux (NC1, NC2) pourraient correspondre, sans plus de certitude, à des niveaux d'assainissement ou à des lambeaux de sol marquant l'emplacement d'aires de travail (niveaux de sciage de calcaire ?) en relation avec les niveaux de démolition NMD, PTG1 et PTG2. Plus à l'ouest, les niveaux de démolition (PTG3, PTG4) recouvrent très largement l'empierrement Rd4. Le niveau inférieur PTG4 et les couches sous-jacentes (29, 30, 24) sont entaillés par une fosse F4 creusée postérieurement à leur installation. Ces niveaux pourraient être en relation avec l'état gaulois et/ou romain du sanctuaire à péribole ovale qui est tout proche mais dont la configuration nous est presque entièrement inconnue.

4.1.4 Conclusion

Les prospections LiDAR et géophysiques ainsi que l'utilisation de tranchées de sondage ont permis de préciser la géographie des terrasses alluviales quaternaires mais aussi la position et quelquefois la chronologie des écoulements.

Cette proposition de restitution des terrasses et des écoulements anciens a été comparée avec la carte de l'aléa fluvial, établie par la société SINTEGRA à partir de levés topographiques et des données de la crue de l'année 1990 (Bossuet & Thivet, 2006). Sur le Plan de Prévention du Risque d'Inondation, la délimitation des zones inondables en fonction du caractère plus ou moins fort de l'aléa fluvial a été modélisée sans tenir compte des ouvrages de protection édifiés contre les crues (digues). La figure 185 présente la superposition sur un ombrage simple LiDAR, de la géologie, de la paléohydrographie et de l'aléa fluvial. Quel que soit son degré d'importance, la cartographie de l'aléa fluvial concerne exclusivement les espaces occupés par les alluvions modernes Fz. Les aléas les plus forts se retrouvent dans les secteurs de « Champs Pelletier », à l'intérieur de la boucle, là où ont été mis en évidence les traces de migration d'un paléoméandre (cf. partie 3), aux « Isles devant Mathay » et au « Pré Burnier » où des traces de chenalisation ont été détectées à proximité des rives du Doubs.

Le « centre urbain » de l'agglomération antique situé aux « Combottes » et au sud de « Champs Pelletier » se localise dans une zone non-inondable qui correspond à l'élévation d'une butte sablo-graveleuse bien marquée dans la topographie (cf. partie 3.3).

Au pied de la terrasse Fy, la zone des « Ouchottes », où différents chenaux ont été repérés et datés, apparaît comme un secteur soumis à un fort aléa fluvial. On rappellera qu'à l'époque antique, une digue de gros blocs avait été édifiée en amont de ce bras mort afin d'empêcher l'ennoiement lors des crues de la rivière (Jeannin, 1986, Bossuet *et al.*, 2001).

Enfin, en rive gauche du Doubs, la zone à fort aléa située entre les « Combolles » au nord et la limite de terrasse Fy au sud, concentre de nombreuses traces de la migration latérale d'un méandre de la rivière.

Désormais, il est nécessaire de compléter la cartographie documentant le réseau hydrographique ancien, établie dans ce tronçon de la vallée. Si possible, les informations chronologiques complémentaires devront préciser les dates d'incision des paléochenaux et leur durée de fonctionnement de façon à mettre en relation les indices d'occupation aux époques pré-protohistoriques avec la dynamique alluviale.

4.2 Étude de l'évolution du couvert végétal et l'impact de l'homme sur le milieu durant la période holocène

Dans le but d'appréhender l'évolution du couvert végétal et l'impact de l'homme sur le milieu durant la période holocène, plusieurs carottages ont été effectués depuis 2001, dans différents remplissages alluviaux de la vallée du Doubs (Bossuet *et al.*, 2001, 2002, 2003, 2005, 2006).

L'analyse des échantillons provenant de ces enregistrements sédimentaires a malheureusement toujours révélé un contenu sporo-pollinique insuffisamment riche pour établir à ce jour un premier diagramme pollinique (Bossuet et al., 2006).

Ces échecs nous ont conduits à élargir les prospections à d'autres secteurs de la vallée et des plateaux calcaires environnants. Par le passé, nous avions consulté en guise de travail préparatoire la carte des zones humides du département du Doubs établie par la Direction régionale de l'environnement. Ce document ne mentionne l'existence d'aucune zone humide (marais, tourbières, landes humides de plaine ou de plateaux) dans un périmètre proche de la zone d'étude. Cependant, l'exhaustivité de cet inventaire ne valait que pour des zones humides dont la superficie est supérieure à un hectare, excluant de fait les zones de dimensions beaucoup plus petites.

C'est dans l'optique d'en repérer plus facilement l'existence que nous avons recherché dans le corpus informatisé des microtoponymes du début du XIXème siècle les noms de lieux-dits évocateurs de zones humides. Un inventaire microtoponymique a en effet été construit à partir du dépouillement du cadastre ancien napoléonien des vingt communes incluses dans l'emprise de la fenêtre LIDAR ; il permet de classer et de spatialiser thématiquement via des requêtes SIG les appellations de lieux-dits en fonction des termes qui ont servi à leur formation (sol, végétation, eau, topographie, forêt, agriculture, habitat, faune).

L'analyse du corpus via cette procédure a conduit à retenir, sur le plateau calcaire du Romont, une petite vallée encaissée dite de la « Combe de Warembourg » (commune de Bourguignon) et plus particulièrement un secteur correspondant sur le plan cadastral napoléonien à deux microtoponymes caractéristiques de lieux humides, à savoir « Au Marais » et « Au Marches » (de l'appellatif *Marchière*, pré marécageux) (fig.186).

Cette partie du fond de thalweg est encore aujourd'hui occupée par un marais qui abrite une aulnaie marécageuse, elle-même parcourue par un écoulement temporaire connu anciennement sous l'appellation de « ruisseau de Warembourg ».

Dans la perspective d'une analyse fine des relations homme/milieu, il est important de signaler que les sources anciennes et récentes (Parent 1953, Aimé, 1998) mentionnent l'existence dans ce secteur de plusieurs sites archéologiques d'époque protohistorique (tumulus) et gallo-romaine (villa) localisés dans la combe et sur les hauteurs dominant « la ferme de Warembourg ». Certains d'entre eux, (« Bois de Mont-Pourron », « Les Arrues ») font l'objet d'une reconnaissance préliminaire spécifique (cf. partie 4.3).

Les plus anciennes mentions d'occupation du sol en vignes dans ce secteur remontent à 1450, date à laquelle Thiébaud III de Neuchâtel accorda à Thévenot de Bourguignon, moyennant un cens recognitif, le droit d'aménager un pressoir (truil). En 1773, la vigne recouvrait encore 33 arpents de terre et la production était alors de 60 muids (Courtieu, 1985). Jusqu'au XVIIIème siècle, le village de Bourguignon resta essentiellement un bourg rural dont l'économie agro-pastorale n'était guère florrissante (Courtieu, 1985). L'élevage porcin et ovin prédominant ne fut remplacé progressivement par les bêtes à cornes et les chevaux qu'au cours des XVIIème et XVIIIème siècles. Cette augmentation du nombre de chevaux et de bœufs marqua une expansion des surfaces labourées, principalement sous forme de culture de seigle et d'avoine.

Sans plus de précision, on peut aussi noter que le ruisseau a servi à installer un battoir à grain transformé plus tard en turbine électrique (Courtieu, 1985).

Le remplissage du marais a été reconnu en juin et juillet 2010 par une série de forages carottés implantés de part et d'autre du ruisseau, coté nord (War1-4, War 5, 6, 7 et 8) et côté sud de la vallée (War 9 et War 10). Les premières analyses (susceptibilité magnétique des sédiments, tests palynologiques) ont concerné exclusivement le forage War 1-4.

Parallèlement à ce travail nous avons restitué sur l'ensemble du bassin versant la nature de l'occupation du sol au début du XIXème siècle et son degré de fertilité à partir du dépouillement de l'état des sections du cadastre ancien des communes de Bourguignon, Ecot et Mathay (fig. 187a).

4.2.1 L'occupation du sol au début du XIXème siècle et son évolution à la période contemporaine

La représentation cartographique de l'occupation du sol montre qu'au début du XIXème siècle les parties inférieures des versants nord et sud de la combe de Vaux sont cultivées en vigne et en prés alors que les parties supérieures et le sommet des versants sont plantés en bois (bois communaux et bois taillis) (fig. 187a). A cette époque, l'emprise de la zone humide marécageuse correspond, dans la combe, à des prés à très faible degré de fertilité.

L'examen du cliché de la mission IGN de 1951 (fig. 187b) révèle qu'une transformation du paysage moderne s'est opérée sur le versant nord de la combe avec la présence de friches et de prés à

l'emplacement de parcelles auparavant cultivées en vigne. Sur le versant sud, une recolonisation forestière (plantations de feuillus) est déjà engagée à cette date sur une partie des parcelles auparavant cultivées en prés puis replantées en bois.

Cette évolution se poursuit jusqu'à la période actuelle comme le montre l'orthophotographie de 2009 (fig. 187c) où la « Combe de Warembourg » apparait entièrement boisée, avec le développement de l'aulnaie marécageuse dans le fond du vallon et de plantations de frênes sur le reste des pentes, exception faite du sommet du versant sud dont le couvert forestier a été défriché entre ces deux dates.

4.2.2 Analyse du remplissage sédimentaire de la « combe de Warembourg »

Plusieurs types d'analyses (susceptibilité magnétique, granulométrie, minéralogie, palynologie, matière organique) sont envisagés sur les différentes séquences prélevées dans ce remplissage marécageux. Ces analyses ont pour objet de renseigner sur l'origine, les conditions de transport et de dépôt des sédiments étudiés et sur l'intensité des processus de sédimentation (colluvionnement, alluvionnement) à l'origine du comblement de cette partie de la vallée. Les premières analyses ont été engagées dès cette année avec la mesure de la susceptibilité magnétique des sédiments de la séquence War1-4 et la réalisation des premiers tests palynologiques.

La susceptibilité magnétique

La susceptibilité magnétique a été mesurée avec le système MS2 Magnetic susceptibility meter et le capteur MS2E1 de *Bartington Instruments LTD* (fig. 188). Le capteur MS2E1 est spécialement conçu pour la mesure de la susceptibilité magnétique sur de demi-carottes de sédiments. La réponse spatiale du capteur, combinée à un pas de mesure très fin, en fait un outil particulièrement bien adapté à l'analyse haute résolution des variations de la concentration en minéraux magnétiques des sédiments. Les mesures ont été effectuées tous les ½ cm entre les cotes 0 et 240 cm avec le capteur orienté parallèlement au plan de la stratification.

Les variations de la valeur de la susceptibilité magnétique permettent d'individualiser, du sommet à la base du remplissage, plusieurs zones (SM). On distingue :

- les zones SM1, SM3, SM5, SM7 qui correspondent à des augmentations significatives de la susceptibilité magnétique ; ces zones sont associées dans la stratigraphie à des dépôts argileux et de limons argileux. Le passage à ces types de dépôts s'opère soit de façon rapide comme dans le cas de la zone SM5 ou de façon plus lente comme dans le cas de SM3, traduisant dans ce dernier cas un passage progressif d'un faciès de limon sableux à celui de limon argileux.

- les zones SM2 et SM6, caractérisées par des valeurs de susceptibilité magnétique relativement plus faibles qui correspondent à des dépôts de limons sableux et des limons argileux organiques. La zone SM4 (112 à 126 cm) est associée à une couche de graviers roulés dans une matrice limoneuse ; la mise en place de ce faciès est à mettre en relation avec un changement radical du régime de l'écoulement (milieu de forte énergie). Deux autres épisodes comparables sont enregistrés aux cotes 168 à174 cm et 216 à 223 cm.

La forte variabilité du signal magnétique indique d'importantes modifications dans la nature et donc dans l'origine des apports sédimentaires constituant le remplissage de ce marais. Le changement dans la nature des matériaux sédimentés (faciès argileux beaucoup plus riches en minéraux magnétiques) intervenant pendant les périodes SM3 et SM5, et à un degré moindre SM7, pourrait refléter les effets de l'accentuation de la pression humaine sur le milieu végétal, ce qui entraine notamment une possible accélération des processus érosifs des sols du bassin versant bien marquée par l'augmentation significative des valeurs de la susceptibilité magnétique des sédiments.

Les autres analyses

A des fins d'analyses palynologiques, un échantillon de sédiment a été prélevé tous les 10 cm le long des 2,40 m de la séquence War 1-4. Les tests effectués montrent malheureusement des pollens en très mauvais état de conservation et en quantité notoirement insuffisante pour permettre l'établissement d'un diagramme pollinique. C'est pourquoi une nouvelle série d'échantillons provenant des sondages effectués au pied du versant sud de la combe sera prochainement testée. Au plan chronologique enfin, deux datations radiocarbone AMS ont été réalisées sur des échantillons prélevés aux cotes -128,5 cm et -230,5 cm afin d'obtenir une première information sur l'âge de ces dépôts. Les résultats des datations ont donné 928-795 cal. B.P. (1022, 1155 cal A.D) pour l'échantillon prélevé à la cote -128,5 cm, soit des dépôts contemporains des XIème et XIIéme siècle de notre ère (début du bas Moyen Age) et 3211-2956 cal. B.P. (1261, 1006 cal B.C) pour l'échantillon prélevé à la cote -230,5 cm soit, des dépôts contemporains du XIIIème au XIème siècle avant notre ère (Bronze final).

Trois autres séquences ont été prélevées sur le versant sud dans le but de trouver des pollens bien conservés mais les analyses n'ont à ce jour toujours pas été effectuées. Ce fait est d'autant plus regrettable en regard des potentialités qu'offrait ce remplissage dans l'analyse des variations du couvert végétal consécutives aux changements intervenus dans l'économie locale, bien connus grâce aux sources historiques (apparition des forges de Bourguignon et d'Audincourt, disparition de l'élevage de caprin, expansion des zones labourées etc.).

4.3 Détection et caractérisation microtopographique des sites fortifiés de hauteur et de plaine. La révolution LiDAR ?

Selon les époques, les sites de hauteur, naturellement ou artificiellement fortifiés, ont fait l'objet d'une occupation plus ou moins continue et en rapport avec des fonctions bien différentes : stratégique, militaire, symbolique, ostentatoire, religieuse (Millotte & Lambert, 1996 ; Fichtl, 2005 ; Chevrier, 2009). Si les fortifications et les enceintes témoignent traditionnellement du rôle défensif et de la fonction stratégique de ces sites, les structures défensives incarnent également, dans le paysage qu'elles dessinent, des centres de pouvoir et des marqueurs territoriaux. Les vestiges des ouvrages de défense (talus du rempart, fossé d'enceinte, porte, tour,….) et d'aménagement de ces sites (plateforme, terrasse, voies d'accès) subsistent généralement dans la topographie sous la forme d'élévation ou de creux a priori aisément détectables par la méthode LiDAR, notamment lorsqu'ils sont conservés sous couvert boisé.

L'analyse de la nature de l'occupation du sol (cf. partie 1) montre que notre fenêtre d'étude de 81 km², est occupée à 49% par les espaces boisés ; les surfaces calmes des plateaux calcaires, propices à ces installations, sont recouvertes à 57% par la forêt et constituent un secteur à fort potentiel de conservation des vestiges. A l'intérieur ou à proximité immédiate de cette fenêtre, de part et d'autre de la vallée du Doubs, plusieurs sites fortifiés de hauteur, d'époque pré et protohistorique, sont en effet mentionnés, que ce soit sur le plateau du Lomont à l'est, ou sur celui du Romont à l'ouest (fig.190). Le bilan des connaissances établi à partir de la documentation ancienne et des prospections récentes montre également que la plaine alluviale du Doubs, en dépit des nombreux travaux et aménagements, conserve encore dans son espace les traces matérielles de plusieurs sites défensifs d'époque historique différentes (Haaz, 2009). Ce nouveau travail de prospection sur un secteur densément occupé du pays de Montbéliard, s'inscrit dans la suite logique de travaux synthétiques plus anciens consacrés notamment au recensement et à l'étude des camps fortifiés de Franche-Comté durant la pré- et la protohistoire (Passard, 1980; Urlacher & Passard, 1987 ; Millotte & Lambert, 1996 ; Barral *et al.*, 2007b).

Par son caractère extensif et sa capacité à détecter les structures les plus ténues même sous couvert boisé, le LiDAR apparaissait comme la méthode d'approche la plus appropriée à ce type de recherche. Les travaux récents révèlent que cette méthode de prospection peut détecter un nombre important de nouveaux sites y compris dans des zones archéologiquement assez bien connues (Daval & Fruchart, 2011).

L'analyse de la bibliographie consacrée aux exemples d'application de la prospection LiDAR à la reconnaissance des sites fortifiés (Devereux *et al.*, 2005 ; Bewley *et al.*, 2005 ; Doneus *et al.*, 2008) montre que la contribution de la méthode est souvent examinée à partir de la présentation détaillée d'un site connu et plus rarement à partir d'une appréhension globale de ce type de sites, identifiables ou non à l'échelle de la zone prospectée.

L'objectif de notre étude, exclusivement basée sur l'exploitation des données LiDAR, est de documenter dans l'emprise de la fenêtre tous les sites à caractère défensif déjà connus, en apportant de nouvelles informations à différents niveaux d'analyse (morphologie, organisation, relation avec le cadre naturel) mais également d'en découvrir d'autres, inédits, qui pourraient être ensuite caractérisés à partir de données fournies par la prospection au sol, indices chronologiques d'occupation notamment.

Les inventaires régionaux menés en Franche-Comté sur les habitats de hauteur au Néolithique, distinguent quatre types principaux d'organisation de camps à partir de la forme et de l'emplacement du système défensif : les escarpements encerclés, les éperons barrés, les enceintes à deux accès, et les rebords de plateau (ou enceintes fermées) (Urlacher & Passard, 1987) (fig. 189). C'est en référence à cette typologie des habitats fortifiés de hauteur que seront analysés les résultats de la prospection LiDAR. A noter cependant qu'à ces modes d'occupation il convient d'ajouter pour la période Néolithique les stations de hauteur et les sommets de collines sans rempart apparent, beaucoup moins aisément identifiables.

4.3.1 Répartition des sites fortifiés connus

La figure 190 présente la liste des sites fortifiés recensés dans et à proximité de la fenêtre LiDAR et leur localisation. Actuellement, on dénombre toutes époques confondues et sur une superficie de 120 km², 21 sites fortifiés, plus ou moins bien documentés, avec une prédominance des époques préhistorique et médiévale représentées respectivement par 6 et 9 sites qui ont fonctionné durant ces périodes.

L'examen des durées d'occupation montre que sur les douze sites situés dans la zone d'étude, deux ont été fréquentés durant la Préhistoire, trois durant l'Âge du Fer, trois durant l'Antiquité, sept durant le Moyen Age, un site ne fournit pas d'indices chronologiques.

La qualité et la richesse de la documentation sont naturellements très variable d'un site à l'autre, variant d'une simple mention de la présence d'un autel sacrificiel par exemple (Parent, 1953) à des études beaucoup plus approfondies rassemblant et synthétisant les connaissances sur un mode occupation bien défini à l'échelle régionale (Passard, 1980 ; Aimé, 1993 ; Millotte & Lambert 1996).

4.3.2 Présentation des sites connus

4.3.2.1 Les enceintes de plaines

4.3.2.1.1 Mathay, la « Combe » (336 m)

D'après les sources historiques, cette « fort maison » de Mathay, propriété du seigneur de Mathay Berchin de Saint Maurice, est supposée avoir été édifiée durant la fin du XIIIème siècle et détruite une première fois en 1344 à la faveur d'une expédition de Jean de Montaigu puis une seconde fois en 1525 durant la guerre des « Paysans » (Courtieu, 1985). Sa date de démolition, peu précise, serait intervenue pendant la guerre de Dix ans ou après la conquête française. Les ruines de cette maison forte sont situées aujourd'hui entre un lotissement pavillonnaire et la rive gauche du Doubs (fig. 191). De cette maison ne subsiste plus qu'une partie de l'enceinte (fig. 191) qui s'aperçoit sur le modèle généré en trois dimensions. Les élévations linéaires d'environ 3 m de hauteur observées au nord et au sud du site correspondent aux vestiges des deux murs d'enceinte de la maison forte. Ils délimitent un espace intérieur d'environ 0,64 ha (fig. 191). Le mur côté ouest a été vraisemblablement détruit par les aménagements liés à l'urbanisation de la plaine alluviale dans ce secteur de Mathay.

En direction de l'est, l'anomalie qui marque l'emplacement du mur sud de la fortification s'arrête au contact d'un changement caractérisé dans le découpage du parcellaire napoléonien. A cet endroit, les parcelles dont la forme s'allonge parallèlement au cours actuel du Doubs, marqueraient la position de la paléoberge contemporaine de l'édification de la maison forte médiévale.

Le profil topographique tracé à travers la fortification révèle, en partant du nord-est, un premier talus qui marque l'enceinte extérieure de la maison forte. Ce talus, d'une hauteur de 1,5 m est large d'environ 13,5 m. Il est immédiatement suivi d'une petite dépression de 10 cm de profondeur (trace de fossé ?). Ensuite un replat est observé sur 5 m de largeur avant de retrouver à nouveau une dépression de 10 cm de profondeur. Ce fossé marque le début d'une élévation en plateforme de 20 m de long et de 1,5 m de haut. Cette élévation est à mettre en relation avec une construction centrale dont nous

pouvons encore observer le soubassement. A la surface de cette plateforme, deux petites élévations apparaissent, traces probable de murs. Au sud-est de cette structure, figure à nouveau une dépression (fossé) de 10 cm de profondeur suivi d'un replat d'environ 15 m de large. Celui-ci est relié au mur d'enceinte par un nouveau fossé de 10 cm de profondeur. Le mur d'enceinte sud-est est matérialisé par un second talus de 3 m de haut sur sa face interne et environ 2 m sur sa face externe.

Le mode de représentation « Sky View Factor » (fig. 192) visualise en détail ce qui reste de l'organisation de ce site fortifié avec une construction centrale (1) carrée de 20 m de côté implantée sur une plateforme (motte) à laquelle succède sur son coté sud-est un espace dont la délimitation évoque la forme d'une basse-cour mais de petite dimension (2). Des fossés semblent avoir bordé les parois internes de l'enceinte mais aussi le pourtour du bâtiment central. L'agencement des nouvelles structures détectées par le LiDAR à l'intérieur de l'enceinte incite à reconnaitre là les vestiges d'une ancienne motte castrale.

4.3.2.1.2 Mandeure, le *castrum* des « Cloux du Château » (335 m)

La fortification du Bas-Empire, *castrum*, édifiée en bordure du Doubs au milieu du IVème siècle et encore occupée au VIIème siècle et VIIème siècle (cf. partie 1.3.4) a fait l'objet de nombreuses investigations depuis le XIXème siècle, période pendant laquelle F. Morel-Macler a effectué les premières observations sur la topographie du site (Morel-Macler, 1847) (cf. partie 3.3).

Actuellement, l'emprise de cette fortification, en forme de « cloche », se marque dans la topographie par une légère surélévation du terrain, en quart de cercle, dont le modelé a été en partie modifié par les nivellements consécutifs aux différentes opérations des fouilles intervenues depuis 1864. Malgré cette réserve, sur la représentation tridimensionnelle du MNT (fig. 193) le tracé du mur de la fortification subsiste sur tout le pourtour de la moitié sud de l'enceinte sous la forme d'une élévation de moins d'1 m de hauteur. La moitié nord de l'enceinte, fossilisée sous les constructions d'une zone pavillonnaire est inaccessible aux observations. La structure la mieux marquée dans le paysage demeure la voie d'orientation est-ouest reconnue par la prospection géophysique dont le tracé relie la porte de l'entrée est de la fortification à la berge de la rive droite du Doubs. Cette voie est matérialisée par un bombement de 20 m de large et de moins d'1 m de haut.

En dehors de ces deux structures, dont l'empreinte dans le paysage avait été remarquée depuis très longtemps, rien d'autre n'est discernable dans le relevé microtopographique de la prospection LiDAR. Les informations les plus détaillées sur l'organisation du site sont apportées par des prospections géophysiques et naturellement par les fouilles.

4.3.2.2 Les buttes témoins

4.3.2.2.1 Autechaux-Roide, « Derrière la Motte » (403 m)

Ce site de butte témoin, qualifié par le microtoponyme « Derrière la Motte » est situé à l'extrême sud de la fenêtre LiDAR ; il est actuellement recouvert par une pâture parsemée de quelques arbres. La seule référence bibliographique provient de Gérard Aimé, qui, en 1994, faisait mention d'une

«structure, qui, si elle a sans doute un socle naturel, présente des traces évidentes de modelage par apports de sédiments, aménagement de drains d'irrigation, etc. La terrasse au sommet (26,7 m sur 12 m) est étonnamment plane à l'exception de deux pierres qui semblent grossièrement équarries.» (Haaz, 2009). Toutefois, aucun matériel n'a pu être découvert.

La prospection LiDAR montre bien une élévation d'une trentaine de mètres à sommet aplani avec un système de drains à sa base (fig. 194). Malheureusement, le fait d'être située en limite de la fenêtre, avec un nombre limité de recouvrements et la présence de quelques conifères rendent toute étude du sommet de la structure impossible.

4.3.2.3 Les enceintes fermées ou rebords de plateau

4.3.2.3.1 Valentigney, le « Bannot » (360 m)

Ce site d'enceinte fermée, surplombant la vallée du Doubs, est situé sur la commune de Valentigney, au lieu-dit « Le Bannot », sur le rebord d'une entaille du plateau calcaire du Lomont. Cette enceinte médiévale, située en pleine forêt, était connue depuis longtemps car une limite de parcelle le traverse de part en part (Duvernoy 1875, Aimé 2000). Autour du site proprement dit du « Bannot » plusieurs micro-toponymes de l'ancien cadastre napoléonien (**«** Sur le Bannot », « Sous le Bannot », « Devant le Bannet **»)** situent par leurs particules la position dans le paysage d'un lieu, « *bannus* », où s'est vraisemblablement exercé un pouvoir seigneurial au Moyen Âge (Fontaine 1995).

Le modèle numérique de terrain 3D restitue un système défensif constitué d'un rempart associé à un fossé. Le plan de ce site fortifié est celui d'une enceinte en forme de U renversé de 90 de long par 36 m de large, accolée à la falaise et délimitant un espace intérieur de 0,33 ha. Le talus du rempart mesure en moyenne 1,50 m de haut et est bordé à l'extérieur par un fossé d'environ 1,50 m de profondeur (fig. 195). A l'intérieur de l'enceinte, le profil topographique (A-B) est décroissant de l'ouest vers l'est du talus du rempart selon une pente forte mais régulière.

Le tracé d'un profil sud-nord et la représentation des variations du micro-relief avec le « Sky View Factor » mettent en évidence les traces de plusieurs structures inédites localisées à l'extérieur et à l'intérieur de l'enceinte fortifiée (fig. 196).

Le profil topographique C-D, montre après l'escarpement de la falaise, la présence d'un talus d'1 m de haut et celui d'un replat (2), signe d'un probable aménagement anthropique (plateforme). Ce replat est suivi d'une pente douce qui rejoint après 25 m le talus du rempart nord. A cet endroit, le dénivelé entre le sommet du talus et le fond du fossé atteint environ 3 m.

La représentation selon le modèle « Sky View Factor » montre à l'est de la fortification, et en avant de celle-ci, la trace de deux élévations d'une vingtaine de centimètres de haut localisées à l'endroit où les tracés du rempart et du fossé extérieur d'enceinte s'interrompent. La forme et la position des anomalies en relief évoquent les traces d'un ouvrage de défense avancée du passage (barbacane ?) qui permet de franchir le fossé encerclant l'ouvrage fortifié (pont levis ?). Il est important de signaler que

cette structure défensive se situe dans le prolongement d'une dépression rectiligne (chemin en creux) d'orientation est/ouest qui marquerait l'ancien tracé de la voie d'accès conduisant à la fortification.

Plus à l'ouest et à l'intérieur de l'enceinte, l'élévation de forme quadrangulaire (1) située dans l'axe du chemin d'accès, apparaît plus élevée que le rempart contre lequel elle est accolée. Il est difficile pour le moment de relier cette élévation à une quelquonque structure (citerne moderne ?, tour?). Au sud de l'enceinte, à l'emplacement de la plate forme aménagée (2), des traces linéaires en élévation (3) dessinent les murs de défense d'un espace directement construit au contact de l'escarpement de la falaise (tour ?). Ce système de défense se prolonge plus à l'ouest au-delà du rempart, où son tracé apparaît , après une interruption, sous la forme d'un tronçon de mur fondé perpendiculairement à l'axe du fossé d'enceinte (4).

S'agissant des sources historiques, les écrits du XIIIème siècle mentionne la constitution de la seigneurie de Bélieu en tant que propriété du comte de Montbéliard, avec un château du même nom localisé dans la vallée, en rive droite du Doubs. L'enceinte du « Bannot », située 800 m plus au nord sur une falaise surplombant la vallée du Doubs, ne peut être confondue avec le château de la seigneurie de Bélieu. Il s'agit donc bien d'un édifice différent, en rapport peut-être avec un fief dont l'existence à Valentigney est évoqué à la faveur d' une cérémonie de foi et hommage faite en 1295 au comte de Montbéliard.

Le relevé topographique de cette enceinte médiévale conservée sous couvert boisé illustre parfaitement les capacités de détection de la méthode LiDAR et révèle dans les moindes détails le plan de la fortification (fossé d'enceinte, rempart, porte, tour ?, habitat?) mais également des éléments du paysage structurant l'environnement immédiat du site fortifié (chemin d'accès à la fortification).

4.3.2.4 Les enceintes quadrangulaires

4.3.2.4.1 Bourguignon, les « Arrues » (442 m)

Les sources anciennes mentionnent dans ce secteur des « Arrues », non loin du site gallo-romain des « Bonnots d'Arrues » distant de 500 m (cf. 3ème partie), la présence d'autres « vestiges archéologiques » : ouvrage défensif d'époque gauloise et tumulus de l'Âge du Bronze « au pied du Rond Châtelot, côté Vauguille » (Parent, 1953). Des indices de structures observables par le LiDAR se répartissent au lieu-dit « Les Arrues » sur le sommet de deux collines boisées (1) et (2) du plateau (fig. 197a). Sur toute cette zone, la présence de conifères limite la capacité du LiDAR à percevoir les variations du microrelief.

Les deux collines sont reliées par une ligne de crête sur laquelle est élevé un mur en pierres sèches, très probablement moderne (cf. 197b).

Pour étudier les micro-variations du relief de la colline (1) un MNT volontairement dégradé a été utilisé pour générer un « TPI » minorant l'effet du bruit dû aux plantations de conifères (fig.198a). Sur cette figure, on parvient à identifier malgré tout la présence de quatre élévations linéaires d'une cinquantaine de centimètres de haut dessinant une structure carrée de 50 m de coté (1 fig. 198a).

Le côté ouest de la structure est constitué par le mur qui relie par la ligne de crête, les deux collines entre elles. A l'est, en contrebas de la colline, une succession de limites terrasses se superposent en partie aux limites parcellaires du cadastre du XIXème. D'autres élévations, figurées sur la carte, ne correspondent pas à des limites parcellaires connues.

Pour étudier les micro-variations du relief de la colline (2), un modèle « SVF » a été généré (fig. 198b). Celui-ci révèle tout d'abord au pied d'une pente une élévation circulaire (1) de 60 cm de haut et de 8 m de diamètre, qui évoque une structure tumulaire en rapport peut-être avec les tumulus mentionnés dans ce secteur par E. Parent. Deux élévations de formes géométriques, distantes de 140 m, sont également identifiables sur le sommet de cette hauteur:

- la première (2), visible au sud de la colline, se compose de trois élévations de 50 cm de haut délimitant une structure carré de 18 m de côté aux angles vifs

- la deuxième (3), apparue plus au nord, correspond à un talus de 50 cm de haut en forme de U renversé de 13 m x 5 m et aux angles arrondis.

L'étude microtopographique LiDAR met en évidence, dans ce secteur à fort potentiel archéologique, des indices d'aménagements anthropiques de grandes dimensions en dépit de conditions de mesure défavorables (sapins). Le caractère engageant des résultats obtenus sur ce site incite à renouveler les prospections et les contrôles au sol sur l'ensemble de cette zone.

4.3.2.4.2 Mandeure, les « Mallots » (355 m)

Ce site d'enceinte se localise à l'est de Mandeure, à l'extrémité du plateau qui surplombe le théâtre antique, et de part et d'autre d'une route qui le coupe en deux sur toute sa longueur. Cette enceinte quadrangulaire à angles arrondis a été détectée en prospection aérienne en 1976 (Goguey, 1976). Elle a fait l'objet d'une prospection magnétique sur la totalité de son emprise en 2002 et plus récemment d'une prospection électrique automatisée ARP sur la moitié occidentale de son tracé en 2008 (cf. partie 3) (Bossuet *et al.*, 2002, et Bossuet *et al.*, 2009). Cette enceinte constituée d'un double fossé délimite un espace de 0,3 ha. Son plan caractéristique en forme de « carte à jouer » incite à l'interpréter comme un camp romain de cohorte.

L'analyse des données microtopographiques issues de la prospection LiDAR ne révèle aucune anomalie susceptible de trahir sa présence, que ce soit à l'ouest ou à l'est de la route. Sur le profil topographique ouest-est généré perpendiculairement au double fossé de l'enceinte, seule l'élévation correspondant au talus de la route apparaît. Par contre une différence d'altitude moyenne de 40 cm est identifiée entre la partie cultivée en prairie à l'ouest de la route et la partie habituellement labourée à l'est (fig. 199). L'absence de trace s'explique par le caractère périssable des matériaux de construction (Bossuet *et al.*, 2008) et surtout par l'action répétée des labours profonds pratiqués notamment dans la moitié orientale du site, où aucune trace de l'enceinte ne subsiste à la surface et dans le sol. Cette conservation différentielle des vestiges est illustrée par le fait que seule la moitié occidentale de l'enceinte, protégée de la destruction par la prairie, ait été détectée en prospection magnétique (Bossuet *et al.* 2003).

4.3.2.5 Les éperons barrés

4.3.2.1.5 Roches-lès-Blamont, « Chatillon » (524 m)

Ce site d'éperon barré a été analysé en détail dans la troisième partie. Nous rappellerons ici uniquement les principales découvertes faites grâce à la prospection LiDAR. L'éperon était déjà bien connu (Duvernoy, 1875 ; Passard, 1980) que ce soit d'un point de vue morphologique ou chronologique (ramassages de mobilier, sondages et levés topographiques). Outre les vestiges de structures agraires situées à l'est de l'éperon, la prospection LiDAR a révélé un probable système d'accès aménagé à l'éperon, des élévations ponctuelles correspondant à des tas d'épierrements mais aussi à des traces du parcellaire napoléonien encore perceptible dans le paysage (fig. 200).

4.3.2.6 Les escarpements encerclés

4.3.2.6.1 Ecurcey, « Prés de Champ Babon » (518 m)

Ce site d'escarpement encerclé est connu depuis la fin du XIXème siècle par les sources manuscrites comme étant les restes d'un village médiéval nommé « Chamabon » dont la destruction intervint au cours du XVème siècle (Duvernoy, 1875 ; Beurlin, 1889) (cf. partie 3). L'organisation interne et externe de ce site fortifié était en définitive assez mal connue avant la prospection LiDAR de 2009. Cette dernière a révélé de nouveaux bâtiments, une deuxième enceinte doublant le tracé d'une première enceinte beaucoup plus marquée dans la topographie du site mais aussi de possibles aménagements entre les vestiges de la tour située à l'extrémité nord-ouest du site et la première enceinte (fig. 119 et 201). Cette tour a été considérée d'origine romaine par certains auteurs (Duvernoy, 1875 ; Beurlin, 1889). Cette hypothèse nous a incité alors à considérer le site perché et fortifié de « Champ Babon » comme un site de hauteur analogue à ceux de l'antiquité tardive reconnus dans le département du Jura (Bossuet *et al.*, 2010). Ces sites, occupés successivement du IVème au VIIème siècle puis du XIème au XVème siècle, auraient eu, parmi leurs fonctions éventuelles, celle d'assurer le contrôle d'axes routiers et de territoires.

Le programme de recherche qui leur est consacré depuis 2002 a montré que le critère majeur qui semble déterminer l'implantation de ces sites de hauteur est moins les qualités défensives naturelles du lieu que le contrôle remarquable qu'ils offrent sur les vallées environnantes. De ce point de vue, le site de « Champ Babon » répondrait parfaitement à ce critère avec une situation géographique qui permet d'embrasser au nord toute la vallée du Doubs et au sud la confluence de deux vallées perpendiculaires, de la Ranceuse à l'Ouest et du Roide à l'Est (fig. 116). La prospection programmée du site de « Champ Babon » au détecteur de métaux ainsi que la reconnaissance en contrebas des cônes d'éboulis devraient aboutir prochainement à la découverte de matériels indispensables à la précision de sa ou ses durée(s) d'occupation.

4.3.2.6.2 Blamont, le « vieux château » (490 m)

Ce site fortifié serait un ouvrage médiéval ancien dont seule la date de fondation connue serait antérieure à 1282. Les ruines de cette fortification, située en contrebas du château des Wurtemberg

(fig. 25), sur « le revers de la montagne, du côté de Glay », correspondent au château des sires de Neuchâtel, détruit durant les « guerres de Bourgogne » (Courtieu, 1985). Il est construit à mi-pente, en contrebas de l'extrémité de l'éperon au lieu-dit « Vieux Château » sur l'ancien cadastre. Actuellement sous couvert boisé, cet édifice subsiste sous la forme d'une plate-forme taillée à même la roche (fig. 202).

La représentation « Sky View Factor » (fig. 203) montre du nord au sud, une plateforme de 30 m sur 15, suivi d'un léger talus, d'un fossé et d'un rehaussement important, consécutif à un décaissement du substrat plutôt qu'à de la terre rapportée (fig. 203).

La figure 204 présente une vue en trois dimensions de cet ouvrage de défense ainsi qu'un profil topographique selon une direction sud-nord. Ce profil individualise successivement l'empreinte d'un fossé de 5m de profondeur surmonté au nord par un petit talus d'un demi-mètre de hauteur puis celle d'un autre fossé. Le rehaussement proprement dit correspond à une élévation de 2,5 m et est séparé d'un petit talus au nord par un autre fossé. L'espace entre les deux petits talus mesure 17 m de long. Au nord de ce système, sont identifiables un grand fossé de 4 m de profondeur puis un nouveau talus et enfin une plateforme en légère pente.

L'étude morphologique du site et la caractérisation fine de sa structuration autorisent à l'interpréter comme les restes d'une motte castrale.

4.3.2.6.3 Mandeure, le « Chatelet » (435 m)

C'est au toponyme « Le Châtelet », sur le haut de la colline au sud du théâtre antique de Mandeure que furent découverts un numéraire gaulois important (potins* notamment) et du mobilier métallique du haut Moyen Age (petite hache en fer, ferret rectangulaire, scramasaxe* à large lame) à partir d'une prospection autorisée au détecteur de métaux (Jeunot, 2001, Guillot, 1999, Billoin, 2010). Le type de mobilier métallique trouvé serait probablement à mettre en relation avec des sépultures mérovingiennes (Billoin, 2010). La localisation de ces découvertes apparaissait relativement imprécise en comparaison de l'étendue du lieu-dit correspondant à cette appellation toponymique sur le scan 25 de l'IGN. Dans ces conditions, il n'était pas possible d'associer d'éventuelles structures à ces découvertes isolées.

La prospection LiDAR révèle un talus d'une hauteur d'environ 50 cm et d'une longueur de 730 m, délimitant une zone en forme de clé de 6,6 ha accolée aux flancs nord et ouest de la falaise du plateau (fig. 205 et 206). Le matériel retrouvé lors de prospections récentes menées le long du talus se limite à la découverte d'un fragment de sigillée et de ferrailles modernes.

Si le LiDAR a permis de découvrir une structure inédite de grande taille là où du mobilier protohistorique et médiéval a été trouvé, aucun lien ne peut être établi entre cette structure et ces témoins matériels d'occupation du fait de la localisation imprécise des découvertes anciennes et du faible nombre d'objets ramassés lors des prospections récentes. Sur le plan chronologique, en plusieurs endroits, cet enclos est recoupé par des lavières (carrière de pierres plates) dont l'exploitation est probablement contemporaine du XIXème siècle.

4.3.3 Présentation des sites inédits détectés grâce à la prospection LiDAR

A la faveur de la prospection LIDAR, ce sont les indices de quatre nouveaux sites fortifiés qui ont pû être mis en évidence, que ce soit sur les plateaux calcaires ou dans la plaine alluviale du Doubs. La figure 207 présente la répartition de l'ensemble des sites fortifiés en prenant en compte ces nouvelles découvertes.

4.3.3.1 Les enceintes de plaines

4.3.3.1.1 Mandeure, Les « Vignes » (354 m)

Ce site potentiel est localisé au sud de Mandeure, en rive droite du Doubs au lieu-dit les « Vignes ». Il est installé en pied de versant, sur un replat boisé qui surplombe un ancien passage à gué. Le site est bordé à l'est par la falaise du plateau calcaire du Lomont. Aujourd'hui, ce site s'étend en partie sous couvert boisé et a été repéré par la forme arrondie d'un talus qui le caractérise à son extrémité sud (fig. 208).

L'analyse de la microtopographie à partir de « Sky View Factor » met en évidence une série d'élévations linéaires délimitant un carré de 17 m de coté (3) dont les faces nord, sud et ouest sont parfaitement visibles (fig. 209). Le quatrième côté à l'est est probablement recouvert par les dépôts issus du colluvionnement, puisqu'il est situé au pied de la falaise. Au sud de cette structure carrée, quelques élévations se détachent (4) sans qu'il soit réellement possible de les rattacher à une structure particulière. De part et d'autre de cette zone centrale, des anomalies curvilignes et une rupture de pente notée en élévation (2) apparaissent sur le modèle numérique de terrain. Ces anomalies délimitent un espace hémicirculaire d'environ 0,65 ha de superficie dont la forme évoque celle d'une enceinte en cloche. Au sud, le parcellaire napoléonien légèrement incurvé (1), semble bien avoir pérennisé une partie de cette structure de façon comparable à ce qui a été observé à Mandeure au sanctuaire et au *castrum* des « Cloux du Château ».

Les prospections au détecteur à métaux pour essayer de retrouver du mobilier datable sont restées infructueuses en raison notamment des fortes perturbations engendrées par les déchets métalliques modernes (cartouches et éclats d'obus).

4.3.3.2 Les buttes témoins

4.3.3.2.1 Thulay, Le « Tourlot » (440 m)

Ce site, localisé sur une hauteur du plateau du Lomont, est situé à la confluence de deux petites vallées et donne naissance à une vallée qui rejoint selon une direction nord/sud la vallée du Doubs au niveau de Mandeure (fig. 210). Le sommet du promontoire domine les vallées qui le bordent d'environ 20 m.

Sur la représentation « Sky View Factor » (fig. 211) l'extrémité de ce promontoire semble barrée par une élévation longiligne de 120 m (1), orientée Est-Ouest, et isole ainsi une zone de 2,1 ha. Au sein de cette zone, plusieurs anomalies linéaires et circulaires en élévation sont identifiables. Une série de petites élévations ponctuelles est regroupée dans la zone notée (2). Autour de cette zone se distribuent

des élévations linéaires qui laissent penser à un aménagement ou une fortification de l'espace, en rapport avec la position stratégique du site, au débouché de trois petites vallées. Cependant, il est pour l'heure impossible de relier les structures entre elles. Les prospections au détecteur n'ont pour le moment rien donné, à cause de la pollution de la zone occasionnée par la présence de déchets métalliques (cartouches et éclats d'obus).

A l'exception de l'anomalie (2), le reste des anomalies détectées par le LiDAR ne correspond à aucune des limites parcellaires figurées sur le plan parcellaire du cadastre ancien.

4.3.3.3 Les escarpements encerclés

4.3.3.4.1 Remondans, « Bois de Plamont » (455 m)

Ce site est situé à l'extrémité du « Bois de Plamont » sur un replat dominant la vallée de la Ranceuse, affluent du Doubs. Le site est composé de trois talus parallèles d'1 m de haut, orientés nord-sud, dans le sens de la pente et qui délimitent une surface de 1,4 ha (fig. 212). Il n'a pas été possible pour le moment de prospecter cette zone.

Ce site du « Bois de Plamont » présente, de par sa position géographique, des analogies avec le site très proche du coteau de « Montsepied », où, sur une butte témoin allongée, située un peu plus en amont dans la vallée, a été découverte et prospectée une petite enceinte néolithique du type éperon barré. Le mobilier découvert en surface (fragments de poterie, éclats de quartzite micacé, outils en chaille et en silex) bien que très pauvre aurait été néolithique (Millotte, 1969).

4.3.3.3.2 Roches lès Blamont, « Forêt de Châtel », (513 m).

Ce site fortifié est localisé sur l'ancien cadastre napoléonien à l'emplacement du microtoponyme « Forêt de Châtel », en limite est de notre fenêtre LiDAR. Sur le plateau du Lomont, il occupe l'extrémité d'une butte allongée perpendiculairement à l'éperon barré de « Chatillon » (cf. supra), dont il est distant de 300 m environ à vol d'oiseau.

Ce site inédit, détecté sous couvert boisé, se présente sous la forme d'un petit escarpement encerclé par un talus d'1 m de haut (rempart). Au sommet de la butte, ce talus délimite une surface de 0,4 ha.

Sur l'image obtenue à partir du « Topographic Position Index », le tracé du talus se prolonge sur une longueur de 20 m dans la pente nord de la butte. A l'opposé, sur le flanc sud, un bombement de 2 m de large et de 20 cm de haut, visible sur une longueur de 55 m, pourrait signaler les vestiges d'un ancien rempart de contour (fig. 213). Le tracé de l'enceinte présente deux interruptions : l'une située en son milieu qui laisse le passage au chemin actuel d'accès à ce camp, l'autre plus excentrée, située près de la pente sud du coteau mais qui n'est reliée à aucune structure visible. A l'intérieur de l'enceinte, et tout à l'est du site, deux élévations sont identifiables : la première située sur un replat correspond à une élévation de 60 cm, la deuxième plus petite, située dans la pente sud, mesure 15 cm de hauteur.

Sur l'image obtenue à partir du « Topographic Position Index » (fig. 214), on décèle également les anomalies caractéristiques de plusieurs charbonnières sur le sommet et le flanc nord de ce coteau du

« Bois des Cotay ». Dans un ouvrage « Le Charbonier dans les Bois », écrit au XIXème siècle et édité en 1969, ce lieu-dit est explicitement cité par l'abbé Bouchey comme ayant été exploité au milieu XIXème siècle par ses parents charbonniers afin de produire le charbon de bois destiné aux forges d'Audincourt (Bouchey, 1969).

Lors de la prospection du site au détecteur de métaux, un lingot en fer de forme bi-pyramidale et d'un poids de 6,5 kg a été découvert. Il était enfoui à l'est du site, en contrebas du camp, sous un arbre à 20 cm profondeur. Au vu de sa forme et de ses dimensions (type BCS1, section carrée, extrémité resserrée, longueur 26 cm), ce demi produit bi-pyramidé peut-être attribué à la fin du premier Âge de Fer (Berranger, 2009) (fig. 215) (cf. la fiche de découverte en annexe). La découverte de ce lingot laisse supposer que les camps de « Chatillon » et de « Forêt de Châtel », très proches l'un de l'autre, auraient pu fonctionner ensemble à la fin du premier Âge du fer.

4.3.4 Conclusion

Plusieurs enseignements peuvent être tirés au terme de cette étude consacrée aux sites fortifiés de hauteur et de plaine.

Au plan archéologique, la prospection LiDAR de 2009 a apporté des précisions sur des sites plus ou moins bien connus (« Chatillon », « Chamabon », « le Bannot », « la Combe »), mais a pu surtout transmettre et fixer une image de sites supposés, soit par découverte isolée de mobilier, soit par leur mention dans les sources anciennes. De plus, de nouveaux sites fortifiés ont été découverts grâce à cette prospection aéroportée, dont au moins un en association avec du mobilier archéologique (« Forêt de Châtel », Roches-les-Blamont), le tout dans une région supposée assez bien connue grâce aux nombreux travaux entrepris depuis le XIXème siècle (fig. 216).

En plus de quatre découvertes de sites probables ou confirmés, sur les dix sites connus ou supposés présents dans la fenêtre LiDAR, la localisation de trois sites a pu être précisée et la connaissance topographique a pu être améliorée sur trois autres. Toutefois, dans deux cas, la prospection LiDAR n'a apporté aucune information nouvelle. Ces sites se situaient tous les deux dans un secteur cultivé où l'érosion par les travaux agricoles a détruit, année après année, les traces susceptibles d'améliorer la connaissance de ces sites.

Les découvertes inédites de sites fortifiés de hauteur faites à Thulay (« Le Tourlot »), à Roches-les-Blamont (« Forêt de Châtel »), à Remondans (« Bois de Plamont ») complèteraient, sous réserve d'informations chronologiques complémentaires, l'image d'une occupation néolithique (camps) préférentiellement installée sur les surfaces des plateaux calcaires situés au sud-est de Montbéliard (Urlacher, 1989). D'après l'examen de la position des sites de hauteur, l'orientation des sites apparait assez variable selon le choix des éperons occupés. S'agissant des caractéristiques géographiques, les voies de pénétration, comme les petites vallées entaillant ces plateaux, semblent bien constituer des zones d'implantation privilégiée de ces sites.

Au plan méthodologique, grâce à sa haute résolution spatiale et à la possibilité d'appliquer un nombre important de traitements numériques adaptés (profil topographique, représentation 3D, analyses

spatiales etc.) la méthode LiDAR s'avère un outil sans équivalent pour appréhender la reconnaissance des sites fortifiés en relation avec leur cadre naturel (géomorphologie, hydrographie…). Cette méthode permet une analyse fine de la morphologie de ces sites, de leur organisation et de l'implantation de leur système de défense par rapport à la contrainte topographique.

Cette méthode de prospection connaît des limites du fait des conditions particulières de fossilisation des vestiges. Les conditions taphonomiques divergent énormément entre chaque site en fonction des différents paramètres tel que le type de structure, l'érosion, le colluvionnement, l'action anthropique etc. Il est par exemple difficile de mettre en évidence des structures d'habitats souvent très mal conservées en surface.

Les prospections géophysiques peuvent partiellement remédier à ces problèmes mais restent étroitement dépendantes des conditions géologiques (cf. partie 3).

De plus, de nombreuses anomalies peuvent être observées à l'intérieur et à l'extérieur des camps sans qu'il soit possible de toujours d'en identifier la fonction. La détection de sites grâce à la technologie LiDAR oblige donc à se rendre sur le terrain afin de vérifier la nature des anomalies microtopographiques détectées. Toutefois, la méthode de prospection systématique mise en place s'est avérée limitée par la pollution métallique des sites et par le manque de temps.

Enfin, les prospections LiDAR et géophysiques ne permettent naturellement pas de dater les structures, le dernier mot revient donc à la fouille (sondage ou fouille extensive) et dans une moindre mesure au ramassage de surface.

4.4 Restitution de la trame viaire de l'agglomération antique et intégration aux axes de communication de l'est de la Gaule

La ville antique d'*Epomanduodurum* est citée sur la table de Peutinger et sur l'itinéraire d'Antonin comme étant située sur la voie reliant *Vesontio* (Besançon) à *Cambete* (Kembs) puis *Augusta Raurica* (Augst). La vallée du Doubs, au niveau de Mandeure, est en effet le point de convergence de deux axes majeurs de la Séquanie antique (fig. 217).

L'axe le plus important est la voie dite « du Rhin » qui permet de relier Lyon à Kembs via les vallées de la Saône et du Doubs. Cette voie emprunte et longe la vallée du Doubs de Besançon jusqu'à Voujeaucourt où elle ferait un crochet pour desservir l'agglomération antique par le nord (Joan, 2003).

Dans ce même secteur périphérique de l'agglomération, la large voie (10 m), qui structure le quartier artisanal de faubourg de Pont, aboutit à un carrefour en patte d'oie où une borne milliaire a été trouvée (Mougin *et al.*, 1997, Bossuet *et al*., 2004). A partir de ce carrefour cette voie se dirige par une combe vers le sommet du plateau et pourrait matérialiser selon Matthieu Thivet, l'itinéraire possible de la voie du Rhin (Thivet 2008).

Depuis Mathay, le second axe emprunte la vallée du Doubs en direction du sud. Il permet à Pont-de-Roide de bifurquer soit vers l'ouest pour rejoindre Besançon par le plateau soit vers l'est en direction d'Avenches ou Augst (Thivet, 2008).

L'hypothèse d'un axe routier qui se prolonge vers le sud vers Pontarlier en remontant la vallée du Dessoubre apparait assez probable. Cet axe permettrait de relier Mandeure à Orbe ou Yverdon, par le col de Jougne, sans passer par Besançon. Toutefois, l'absence de recherches dans ce secteur du Doubs ne permet pas de confirmer cette théorie.

4.4.1 L'agglomération antique et son espace micro-régional

Les nombreuses recherches entreprises sur l'agglomération antique et sa région environnante ont mis en évidence les vestiges de plusieurs tronçons de voies anciennes qui appartiennent à des voies principales et secondaires. L'existence de ces tronçons a pu être attestée indifféremment par la fouille, la photo-interprétation, l'étude des plans anciens ou les prospections géophysiques. Une carte de synthèse a été dressée pour la fenêtre d'étude et ses abords immédiats : elle localise le plan du réseau viaire de la ville antique, les tronçons de voies, les bornes miliaires, les nécropoles, les points de franchissement du Doubs et les habitats isolés (fig. 218).

Ce bilan des connaissances anciennes et récentes a permis de dénombrer 28 habitats isolés, une vingtaine d'« impacts » et des tronçons de voies reconnus lors de fouilles ou de prospection, trois points de franchissements du Doubs connus ou supposés, trois bornes miliaires et trois zones de nécropoles dont on sait qu'elles sont préférentiellement localisées en bordure des voies et à la périphérie des agglomérations (Grenier 1934).

D'après la carte, en plusieurs endroits, il est difficile actuellement de raccorder les éléments de voirie, reconnus en périphérie de l'agglomération antique et de ses quartiers artisanaux, aux tronçons de voies secondaires ou principales repérés dans leur environnement relativement proche.

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes intéressés principalement à l'étude de quatre zones où ces problèmes de continuité de la trame viaire se posaient avec acuité (fig. 218).

La première zone (A) concerne le nord et l'ouest de la ville antique, là où deux bornes milliaires ont été trouvées et où la liaison entre la périphérie urbaine et le tracé de la voie du Rhin prête à discussion (Jeannin, 1986, Joan, 2003, Thivet 2008).

La seconde zone (B) intéresse la relation du quartier artisanal de l'Essarté avec le sud de la plaine alluviale et les habitats isolés du plateau du Romont et des combes.

La troisième zone (C) examine la possibilité de relier l'est de ce même quartier artisanal au complexe cultuel monumental de la rive droite en empruntant un éventuel point de franchissement du Doubs constitué par un pont ou un gué (Dunod, 1709).

Enfin, la dernière zone (D) est centrée sur l'analyse de la relation entre l'est de l'agglomération antique et les habitats isolés de la plaine alluviale aval et du plateau du Lomont.

4.4.1.1 La zone A, zone périphérique nord-ouest de l'agglomération

Cette zone se situe à la périphérie nord et ouest des quartiers de « Faubourg de Pont » et des « Combottes » au pied du plateau du Romont.

La figure 219 présente le plan du réseau viaire reconnu en fouille et/ou en prospection géophysique (Mougin *et al.*, 1997, 2002 ; Thivet, 2008 ; Gaston, 2008) superposé à la position des nécropoles et à un SVF. Quatre « terminaisons » de voie (V1 à V4) sont répertoriées du sud-ouest vers le nord-est.

La voie V1 correspond à l'axe du Haut-Empire et structure le quartier artisanal de « Faubourg de Pont ». L'extrémité sud-est de la voie rejoint un gué et l'extrémité nord-ouest rejoint le plateau en empruntant une dépression au lieu-dit « les Combes » où sa présence a été reconnue en fouilles et en prospection magnétique (Mougin *et al.*, 1997 ; Bossuet *et al.*, 2008).

Le report sur la prospection magnétique de la position des sondages effectués en 1996 sur le premier tracé du Shunt (2100, 2200, et 2300) montrait que les anomalies détectées correspondaient pour partie à l'emprise de voie antique (chaussée et fossé), à ses aménagements successifs (caniveau) mais aussi à des constructions édifiées en bordure de voie (Mougin *et al.*, 1997).

D'autre part, les anomalies électriques des voies principales (V1b et V1a) détectées dans le quartier artisanal de faubourg de pont, au sud-est, étaient parfaitement prolongées par deux anomalies magnétiques détectées dans la combe : une anomalie curviligne pour la voie V1b et une anomalie rectiligne, apparemment sus jacente pour la voie V1a. Au point de croisement de ces deux anomalies magnétiques, le sondage 2300 révélait dans la stratigraphie deux horizons d'utilisation de la voirie: un premier état semblait fonctionner avec une voie bordée d'un caniveau à cuvelage en bois et un second état associait à la construction des nouveaux aménagements de voirie celle d'un caniveau maçonné (Mougin *et al.*, 1997). Cette stratigraphie interprétée initialement comme la succession de deux états principaux d'utilisation d'une même voie pourrait en fait correspondre à la juxtaposition d'une voie plus récente, V1a, à une voie plus ancienne, V1b, chacune à leur tour ayant emprunté le trajet de la combe pour accéder au plateau.

Au-delà de ce point, le tracé de ce couple de voies est discernable dans la microtopographie sous la forme d'un replat dont le développement suit en bas de pente la topographie du coteau. Cette anomalie correspond sur le plan cadastral napoléonien au tracé du chemin dit « sur la Vie des Combes ».

Des cinq sondages implantés en 1996 sur le tracé de cette anomalie remarquable (sondages 1500 à 1900, Mougin *et al.*, 1997), deux seulement ont révélé des vestiges qui appartenaient à une structure en creux d'époque protohistorique dans le sondage 1500 et à l'aménagement d'un ancien chemin apparu dans les sondages 1500 et 1600 sous la forme d'une couche de cailloux et de galets (Mougin *et al.*, 1997). Dans les sondages suivants (1700, 1800 et 1900) seule la présence d'un limon argileux anthropisé (fragments de tuiles) a été observée. Ce n'est qu'au-delà que les couches de remblai et la chaussée antique ont été reconnues aux points de sondage 2100, 2200 et 2300.

Aux « Combes » l'anomalie microtopographique matérialisant la voie se sépare en deux tronçons, l'un en direction sud rejoint les « Terres Rouges » où l'on perd sa trace, l'autre poursuit son trajet en direction de l'ouest pour accéder via une dépression au sommet du plateau et s'enfoncer dans le bois

des « Lochières ». A cet endroit, par ailleurs, de nombreuses élévations linéaires, traces probables de limites d'anciennes structures agraires, sont relevées dans cet espace déjà boisé au XVIIIème siècle.

La voie V2 correspond au tronçon de voie qui, depuis le carrefour en « patte d'oie », se dirige vers le nord-ouest au lieu-dit « les Combolles en les Montendre ». Ce tronçon a été détecté en prospection électrique et magnétique. Il est bordé dans ce secteur de part et d'autre par des concentrations de mobilier (fragments de sigillées, esquilles d'os brulés) indicateur d'incinérations et d'emplacement possible de nécropole (Nouvel, 2006).

Plus au nord, le tracé de la voie est aligné avec un bosquet sous lequel est conservé un replat situé dans le prolongement exact de la voie. Au delà du point d'inflexion du replat, le tracé se poursuivrait vers le nord pour rejoindre une grande dépression rectiligne entaillant le plateau. Cette dépression est en fait le tronçon de voie reconnu depuis le village et le bois de Voujeaucourt qui, en passant par le « bois de Bambe », relie Mandeure à la voie dite « du Rhin » (Paquier, 1986 ; Joan, 2003).

La Voie V3 se dirige à partir du lieu-dit les « Arbues » via un coteau vers le plateau situé au nord-ouest de ce quartier. Cette voie a été repérée lors des sondages réalisés par l'INRAP préalablement à la mise en place d'une « réserve d'eau brute » (Gaston, 2008). Cette voie n'est bordée que d'un coté par un fossé destiné à participer au drainage. Elle ne présente qu'un seul état, large de 7,90 m, épais de 25 cm au maximum et d'une grande qualité de construction. En raison du manque de matériel datable, C. Gaston proposait que sa mise en place intervienne dès la première moitié du Ier siècle ou au début du IIème siècle de notre ère.

Le prolongement de cet axe vers le nord-ouest aboutit à une dépression rectiligne, longue de 500 m, large d'environ 20 à 25 m et profonde de 10 cm à 1 m. Cette structure rejoint le tronçon qui, dans le « Bois de Bambe », relie Mandeure à la voie dite « du Rhin ».

La dernière voie (V4) court perpendiculairement aux précédentes depuis le nord du carrefour de la patte d'oie sur 350 m où elle s'arrête en impasse. Cette voie de 10 à 14 m de large a été reconnue successivement par les prospections géophysiques et les sondages menés dans le cadre des diagnostiques archéologiques du Shunt 2 et de l'INRAP (Dabas *et al.*, 1999 ; Mougin *et al.*, 2002 ; Gaston, 2008). A partir de là, elle est prolongée par un fossé (F4) de 360 m de long, de 0,8 à 1,6 m de large et d'une profondeur variable d'environ 50 cm. Ce fossé appartient à un réseau fossoyé de drainage composé de trois fossés parallèles orientés nord-ouest/sud-est et de trois autres, également parallèles, orientés nord-est/sud-ouest. Leur datation est imprécise, le mobilier contenu dans le comblement donne une fourchette allant de la Tène finale au premier siècle de notre ère (Gaston, 2008).

Ce fossé (F4) longe une première zone de nécropole avant d'aboutir à une seconde, située à son extrémité nord-est, là où une entaille dans le coteau prédispose à installer un élément de voirie pour accéder au plateau. Cette entaille est prolongée sur le plateau par une dépression curviligne large d'une cinquantaine de mètres sur 1500 m de long. L'analyse du MNT oblige à nous interroger sur l'origine de cette trace (D1) : anthropique ou géologique. En effet, sa forme courbée ainsi que la diminution de l'altitude le long de son tracé pourrait suggérer la présence d'un écoulement ancien

non signalé sur le scan 25 où la carte géologique au 1/50000e mai,s rappelé par le microtoponyme de « Combe Rut » visible sur le scan25.

4.4.1.2 La zone B, zone périphérique sud de l' «Essarté »

Cette zone se situe à la périphérie sud du quartier artisanal de l'« Essarté », dans la plaine alluviale, en rive gauche, au sud de Mathay et à environ 2 km en amont de l'agglomération.

La figure (220) présente le plan du réseau viaire reconnu en fouille, en prospection aérienne et en prospection géophysique superposé à un SVF (Mougin, 2000, Laplaige *et al.*, 2011). Une terminaison probable de voie (V5) est indiquée au sud du quartier.

En 2000, les fouilles préventives réalisées au quartier artisanal de l'Essarté avaient permis de recouper, grâce à plusieurs tranchées, le comblement d'un double fossé mais également celui des structures fossoyées qui lui étaient associées (Mougin, 2000). Les profils transversaux dressés à cette occasion montraient que le fossé ouest, d'une largeur moyenne de 2 m était profond d'environ 1 m. Le fossé est, de dimension à peu près comparable, était bordé, sur son côté ouest, par deux « bassins » d'une dizaine de mètres de large et de 2 m de profondeur. Ces deux fossés étaient séparés d'environ 31 m, distance comparable à celle des limites d'expropriation lors de l'édification de voies (Kaspritz & Nouvel, 2011).

A plus large échelle, il est possible de suivre ce système de double fossés jusqu'à Bourguignon grâce aux clichés pris par P. Augé dans les années 90 (fig. 221). Ces fossés sont aussi visibles sur les clichés de l'IGN de 2011 ainsi que sur l'orthophotographie de 2007 acquises par le PMA et disponibles sur Google Earth© (fig. 220).

Ces aménagements pouvaient correspondre à une double fonction : d'une part, distribution « régulée» de l'eau par un fossé interne et des bassins de rétention, d'autre part assainissement d'une partie de la plaine par un fossé externe drainant le pied de versant. La zone est située au débouché de plusieurs « combes », encore parcourues par des écoulements permanents ou temporaires (cf. partie 4.2). Ce dispositif, reconnu ponctuellement en différents endroits de la vallée du Doubs, est bien en rapport avec l'hydraulique ; il témoignerait d'une volonté de gérer, dès l'époque antique, les contraintes du milieu à une large échelle.

Ces fossés pourraient être aussi interprétés comme les limites d'un axe quittant *Epomanduodurum* pour rejoindre Pont-de-Roide afin de rallier soit Besançon, soit Augst. Plusieurs éléments de voirie ont d'ailleurs été mis au jour à Pont-de-Roide sans qu'il soit possible de relier l'agglomération antique à ces tronçons (Joan, 2003).

La voie (V5) quitterait donc l'agglomération d'*Epomanduodurum* par un itinéraire non encore identifié entre « Faubourg de Pont » et le nord de l'Essarté pour se diriger ensuite vers le sud en empruntant le tracé du double fossé.

À l'intérieur de l'espace délimité par ce double fossé se dessine, à l'ouest de la sablière, une trace linéaire large d'environ 12 m et longue de 150 m. Il est possible d'interpréter cette trace comme la

chaussée d'une voie, mais en l'absence de contrôle sur le terrain et, au vu du contexte sédimentaire, une origine géologique liée par exemple à l'affleurement d'un dépôt de matériaux plus grossiers ne peut être exclue.

Cette voie (V5) permettrait aussi de rejoindre les sites localisés dans les combes ou sur le plateau à l'ouest du Doubs. Le site des « Bonnots d'Arrues » par exemple est aisément accessible par une petite entaille visible sur le SVF (1 fig. 220). Au-delà de l'entaille une anomalie rectiligne en creux (2) se dirige vers le sud-ouest, en direction du site. Les « combes » pourraient donc constituer des accès privilégiés au plateau (cf. supra).

Sans prétendre vouloir restituer les itinéraires à partir de la seule modélisation, nous avons tout de même tenté de vérifier s'il était préférable de passer par le plateau ou par le fond de vallée afin de rallier le site des « Arrues » et les sites localisés dans les combes alentours.

Afin de définir des itinéraires potentiels reliant les habitats isolés à l'agglomération, une « modélisation des chemins optimaux » a été utilisée. Elle permet de déterminer le parcours suivi entre deux lieux et prend en compte les facteurs influant sur la mobilité (Fovet, 2010). Ces itinéraires ont été ensuite confrontés aux autres données (LiDAR, prospection pédestre, carto/photo interprétation etc.). Parmi les facteurs contraignants, on peut par exemple envisager la topographie, le couvert végétal, le champ de vision ou les barrières naturelles créées par les cours d'eau.

Toutefois, nous n'avons aucune idée de la forme et de l'extension du couvert végétal à l'époque antique et notre connaissance des gués et des ponts n'est pas exhaustive dans cette partie du Doubs. Pour ces raisons, seul le facteur topographique a été pris en compte.

L'analyse de la carte de pentes révèle que leur degré d'inclinaison peut dépasser les 30° sur les versants de la vallée ; on peut imaginer que la mise en place et la persistance des trajets correspondent aux itinéraires requérant la dépense énergétique la plus faible (annexe E).

Ce type de modèle est toutefois soumis à trois principaux biais : la variation de la résolution du MNT influe directement sur les itinéraires entre deux points (Fovet, 2010). Le modèle élaboré par Alberto Minetti (Minetti *et al.*, 2002) suppose un déplacement réalisé uniquement à pied, excluant donc le charroi, et qui relie le degré de la pente, que ce soit dans le sens de la descente ou de la montée, à l'énergie à dépenser pour se déplacer à sa surface. Enfin, notre modèle n'intègre pas la position géographique des établissements alentours, c'est-à-dire qu'il appréhende la définition du trajet dans une relation entre un point de départ et d'arrivée unique.

La figure 220 présente le résultat de la modélisation du trajet optimal aller-retours entre les trois établissements connus dans cette zone et le quartier de « Faubourg de Pont ». Dans les trois cas, le chemin optimal modélisé emprunte la vallée du Doubs pour bifurquer plein ouest à hauteur de chaque site plutôt que d'emprunter, dès le début du trajet, la première « combe » accédant au plateau (cf. partie 4.4.1.1).

4.4.1.3 La zone C, zone périphérique est de l'«Essarté»

Cette zone se situe à la périphérie est du quartier artisanal de l'« Essarté », dans la plaine alluviale, en rive gauche. La probabilité de l'existence d'un tronçon de voie reliant l'est du quartier de l'«Essarté» au sud de l'agglomération se fonde sur plusieurs éléments.

La superposition du plan du réseau viaire reconnu en fouille, en prospection pédestre et en prospection géophysique sur le SVF suggère l'existence d'une terminaison probable de voie (V6) en rive gauche du Doubs (fig. 222) et d'un point de franchissement de la rivière, là où J.-M. Dunod signalait la présence d'un pont antique démonté afin de construire l'église de Mathay (Dunod, 1709 ; Jeannin, 1986 ; Bossuet *et al.*, 2001 ; Laplaige *et al.*, 2011).

L'analyse a posteriori d'un cliché très récent (2011) mis en ligne sur le site Géoportail de l'IGN révèle une ouverture dans le mur sud de l'enceinte du grand complexe cultuel de 10 ha situé au sud de l'agglomération (fig. 222.a). Cette ouverture (porte) du mur, à l'image de celles reconnues et/ou fouillées sur le mur ouest en association avec des tronçons de voies, mettrait en communication l'espace profane avec l'espace sacré.

A partir de l'Essarté, cette voie proche de la nécropole aboutirait en rive gauche à la rue du pont. Ce « pont », qui pourrait tout aussi bien être un gué aménagé, rejoindrait en rive droite un talus d'alluvionnement (Ta). Ce dernier coïncide sur le plan cadastral napoléonien avec la limite d'un lieu-dit orienté nord-sud. De part et d'autre de cette limite, les parcelles sont toutes orientées perpendiculairement à l'exception de la parcelle n° 1766, allongée dans le même sens que le talus. A l'est de celui-ci, des anomalies phytographiques linéaires, discernables sur les clichés pris en 2009 (fig. 222b), dessinent au moins un angle droit et sont vraisemblablement d'origine anthropique (fossés ?). Parmi ces traces, deux sont parallèles et espacées de 18 m.

Le prolongement de cette limite de lieu-dit selon un tracé rectiligne rejoint la chaussée maçonnée utilisée comme digue et repérée par Yves Jeannin en rive droite du Doubs (CM). L'édification de cet ouvrage aurait servi à empêcher l'ennoiement de la prairie des « Ouchottes » au moment des crues de la rivière (Bossuet *et al.*, 2001 d'après Y. Jeannin). Il est par contre impossible de prolonger cet axe de communication au-delà de la digue, jusqu'à la prairie des « Ouchottes ».

En outre, dans l'ouverture aménagée dans le mur sud de l'enceinte cultuel (EC), les prospections électriques ainsi que l'orthophotographie de 2011 montrent trois anomalies géophysiques (électriquement résistantes) et phytographiques (croissance des végétaux plus lente) matérialisant la présence de trois plots maçonnés alignés d'environ 6 m de coté et distants de 13 m les uns des autres. Ces anomalies correspondraient aux vestiges d'une porte monumentale (à arc double ?), de même dimension symbolique que le passage monumental repéré et fouillé à travers le mur d'enclos ouest qui sépare un espace à dimension profane d'un espace sacré (Monnier *et al.*, 2006).

Au nord de cette ouverture, la prospection électrique effectuée en 2006 a révélé deux anomalies résistantes linéaires (A1, A2) distantes de 20 m et perpendiculaires au mur d'enceinte. L'anomalie ouest est composée d'au moins quatre segments rectilignes reliés entre eux par des « plots » résistants

de dimension analogue à ceux de la porte sud de l'enceinte. L'ensemble de ces anomalies marque un état de construction qui n'est pas nécessairement contemporain avec l'enceinte de l'espace cultuel érigée durant la deuxième moitié du premier siècle de notre ère. Cependant, la morphologie analogue des plots, la relation de perpendicularité ainsi que les différents états d'édifices à plan centré (temples ?) (T) et de leurs annexes perceptibles au travers de l'intrication complexe des anomalies (cf. partie 3.3) n'exclut pas qu'une partie de ces structures ait fonctionné avec l'enceinte de l'espace cultuel.

Au sud de l'ouverture, les prospections géophysiques et l'étude de l'orthophotographie de 2011 révèlent une anomalie linéaire large de 16 m et longue de 220 m, conductrice et favorisant la croissance des végétaux (A3). Cette anomalie part du sud de la prairie des « Ouchottes » pour infléchir son tracé et passer exactement à travers l'ouverture de la porte puis poursuivre son développement dans l'emprise d'un ancien méandre. Cette anomalie correspondrait à l'incision d'un ancien chenal au sommet duquel aurait été implantée une voie dont la trace de la chaussée aurait été entrevue ponctuellement par un sondage réalisé en 2001 (S) à l'extrémité sud de la prairie.

Ce sondage, positionné sur un replat au pied de la terrasse et en bordure ouest de l'anomalie (A3), n'a pas dépassé la profondeur de 60 cm. L'examen du log stratigraphique montre qu'il ne se raccorde pas aux autres forages réalisés le long du transect. Les graviers jointifs, apparus à partir de 20 cm de profondeur tout comme l'impossibilité de creuser plus profondément que 60 cm, suggèrent un aménagement anthropique probable (Bossuet *et al.*, 2001) du type de celui de la chaussée de la voie (V6).

Au delà de ce point il n'est pas possible de raccorder directement cette voie à la digue ou à un diverticule qui prendrait naissance au point de contact entre la limite de lieu-dit et le début de la chaussée sur digue. Cela dit, sur la base de tout ces éléments, l'existence d'une voie reliant par la rive droite l'« Essarté » est au complexe cultuel est plus que probable.

4.4.1.3 La zone D, zone périphérique est de l'agglomération

Cette zone se situe à la périphérie est supposée de la ville antique. La figure 223 présente le plan du réseau viaire reconnu en fouille, en prospection pédestre et restitué à partir de l'étude du cadastre napoléonien (Jeannin, 1986 ; Bossuet *et al.*, 2001 ; Thivet, 2008 ; Thivet *et al.*, 2009), superposé à un SVF. Quatre terminaisons probables de voie (V7, V8, V9, V10) sont indiquées dans ce secteur.

La voie (V7), en rive droite, emprunterait la levée-digue observée par Y. Jeannin. Cette voie se prolongerait par la suite jusqu'à Valentigney et Audincourt où elle a pu être reconnue dans plusieurs fouilles préventives (Joan, 2003).

La voie (V8) serait à la perpendiculaire de la voie du haut empire reconnu aux « Champs Pelletier » et aux « Combolles ». Au sud des thermes (Th), elle converge vers le probable sanctuaire de « Courcelle » (S) dont l'existence est suspectée par la forme singulière du parcellaire, la présence d'éléments d'architecture en remploi dans les murs des jardins attenants et la reconnaissance de vestiges d'un aménagement antique de la source de « Courcelle » situé à quelques mètres de l'emplacement présumé de ce temple. Une partie du tracé de (V8) correspond sur le plan parcellaire du cadastre

napoléonien au lieu-dit « A Pierre d'Eglantier » écrit « Pré de la Pierre de Lantié » dans le registre des sections de ce même cadastre. L'étude de l'ancien canton de Delle produite par M.-J. Fontaine en 1995 retient l'appellation microtoponymique « Lantié » comme indicatrice de voie et de chemin antique (Fontaine, 1995). Dans ce secteur, proche de Montbéliard, la voie romaine principale porte en effet le nom de « Vie Lantier ». Le microtoponyme « Pierre » désigne en général des endroits pierreux mais peut s'appliquer dans un certain nombre de cas à des tronçons de voies anciennes.

Liste des sites	type	contexte	ordre de grandeur des plus petites anomalies interprétables	apport
Autechaux-Roide, "Derrière la Motte"	butté témoin	boisé	plurimétrique	visualisation du site
Mandeure, les "Vignes"	enceinte de plaine	boisé	pluridécimétrique	découverte du site, découverte et cartographie des structures
Valentigney, "le Bannot"	enceinte fermée ou rebords de plateau	boisé	pluridécimétrique	découverte et cartographie des structures
Bourguignon, les "Arrues	enceinte quadrangulaire	boisé	pluridécimétrique	localisation du site, découverte et cartographie des structures
Blamont, le "Vieux Château"	escarpement encerclé	boisé	pluridécimétrique	découverte et cartographie des structures
Mandeure, le "Chatelet"	escarpement encerclé	boisé	pluridécimétrique	localisation du site, découverte et cartographie des structures
Roches-lès-Blamont, "Forêt de Châtel"	escarpement encerclé	boisé	pluridécimétrique	découverte du site, découverte et cartographie des structures
Mandeure, les "Mallots"	enceinte quadrangulaire	labour	aucun	néant
Thulay, le "Tourlot"	butté témoin	pâture boisée	pluridécimétrique	découverte du site, découverte et cartographie des structures
Roches-lès-Blamont, "Chatillon"	éperon barré	prairie	pluridécimétrique	découverte et cartographie des structures
Ecurcey, "Prés de Champ Babon"	escarpement encerclé	prairie	pluridécimétrique	découverte et cartographie des structures
Mathay, la "Combe"	enceinte de plaine	urbain/péri-urbain	pluridécimétrique	découverte et cartographie des structures
Mandeure, le Castrum des "Cloux du Château	enceinte de plaine	urbain/péri-urbain	métrique	néant
Remondans, "bois de Plamont"	escarpement encerclé	boisé	métrique	découverte du site, découverte et cartographie des

Figure 216. Tableau synthétisant les contextes paysagers et les apports de la prospection LiDAR pour chacun des sites fortifiés présents dans la zone d'étude (C. Laplaige, 2011)

La voie (V9) a été reconnue lors des fouilles effectuées aux « Montoilles » (Mougin, 1990) et passerait à proximité nord du quartier artisanal de la « Récille » fouillé en 2005 (Kuhnle, 2005). Celle-ci convergerait elle aussi vers le point où se placerait l'édifice religieux de « Courcelle ».

Au delà de « Courcelle », aucun axe de circulation n'est visible, mais l'on peut imaginer qu'une voie ait emprunté cette partie de la plaine pour rejoindre le gué signalé à Valentigney par F. Passard et Ch. Tchirakadzé (Joan, 2003), rejoindre Besançon par la voie longeant le Doubs en rive droite (Morel-Macler, 1881) et/ou rejoindre Horbourg au nord (Joan, 2003).

La voie (V10) pourrait se trouver à proximité de la miliaire découverte en 1718 « au dessous de l'écluse du moulin dont on réparait le canal ». Le SVF révèle, à hauteur de cette borne, deux dépressions linéaires et perpendiculaires (D1 et D2) dont le plus long segment rejoint deux autres anomalies du même type (D3 et D4) elles-mêmes situées dans le prolongement d'éléments du réseau viaire antique. (D4) se trouve même dans l'exact prolongement du tracé de la « voie du Rhin » avant que celui-ci ne s'infléchisse pour filer vers le sud-est Ces anomalies rectilignes en creux ne sont pas assimilables à la trace des anciens chenaux dont elles recoupent à l'évidence le tracé. Même si des fluctuations du régime et du tracé de la rivière sont intervenues depuis l'antiquité, il est à noter que ce tronçon du Doubs peut se traverser à pied (présence d'un gué ?).

Ces anomalies, traces probables d'anciennes voies, relieraient alors, par la rive gauche, l'agglomération aux itinéraires précédemment décrits en « desservant » les habitats isolés reconnus à hauteur de la commune de Valentigney (Joan, 2003). La pertinence de ces hypothèses doit être maintenant validée par des fouilles ou des sondages.

4.4.1.4 Conclusion

L'analyse détaillée de ces quatre zones périphériques de l'agglomération antique met en évidence que la communication via les axes principaux ou secondaires s'opère à partir d'un réseau viaire beaucoup plus dense que ce que les interprétations antérieures ont proposé (Bossuet *et al.*, 2001 ; Joan, 2003 ; Thivet, 2008). Cette densité résulte pour partie de l'amalgame de traces dont on ne connaît pas encore la date et la durée de fonctionnement. Il est tout de même primordial de rappeler que toutes ces propositions hypothétiques de voies sont des prolongations d'axes antiques repérés soit en fouille soit en prospection qu'il conviendra de valider par des prospections et/ou des sondages ciblés.

4.4.2 L'agglomération antique

La figure 224 regroupe les tronçons de voie reconnus par la fouille, par les prospections géophysiques et aériennes ainsi que les restitutions proposées à partir des plans de prospection du XIXème, du cadastre napoléonien et de la prospection LiDAR.

Grâce à la reprise des données de prospection, du recalage des plans anciens et également à l'utilisation des données microtopographiques, le tracé des voies a été légèrement modifié depuis la restitution la plus récente (Barral *et al.*, 2010).

La rive gauche apparaît désormais comme beaucoup moins urbanisée que la rive droite (1 et 2). De plus, la reprise des données de prospection a pu démontrer que cette zone de l'agglomération a fait l'objet d'un début de viabilisation de l'espace qui ne s'est pas traduit par une occupation postérieure. Outre le système de voies en forme d'arrête de poisson mis à jour aux « Combottes » (cf. partie 3), le réseau de voies et de fossés, apparemment inachevé, reconnu lors des fouilles de 2009 à la « réserve d'eau brute » (Gaston, 2008) pourrait suggérer un arrêt dans la planification de l'extension urbaine. Cette zone semble toutefois être desservie par un plus grand nombre d'axes en provenance de l'Ouest et du Nord.

En plus de la découverte d'*horrea* (entrepôts) faite le long du Doubs, qui suggèrent la présence d'un port ou d'un embarcadère (secteur des « Combottes »), l'augmentation du nombre probable de points de franchissement a rendu d'autant plus prégnante l'influence du vecteur fluviatile dans l'organisation de l'agglomération. Les recherches récentes proposaient d'identifier avec certitude deux points de franchissement de la rivière, un pont (3), au niveau du *castellum*, ainsi qu'un gué (2) au niveau du sanctuaire des « Cloux du Château » (fig. 224). Les nouvelles données acquises grâce à la prospection LiDAR permettraient d'ajouter 3 points de franchissement supplémentaires, portant le nombre total à cinq (n°1, 2, 3, 4, 5 fig. 224). Ce nombre est supérieur à celui proposé par les chroniqueurs anciens, pour qui les deux parties de la ville étaient jointes par quatre ponts : un situé devant la chapelle Saint-Symphorien, un second près du pont actuel, un troisième dans l'intervalle des deux premiers et un quatrième en vis-à-vis de Mathay (Duvernoy, 1883, Barbier 1895).

Exeption faite de l'ajout d'une voie au sud du complexe cultuel, la voirie en rive droite a été très peu retouchée. En effet, l'urbanisation de la zone a rendu les prospections inefficaces et très souvent impossibles. La prolongation de la voirie jusqu'au secteur de « Courcelle » (6) est basée sur la restitution de la trame viaire qu'en propose Matthieu Thivet dans sa thèse (Thivet, 2008) à partir de l'étude des orientations parcellaires et des micro-toponymes. L'urbanisation moderne est bien évidemment un frein pour la reconnaissance extensive de l'agglomération dont la moitié de la surface se trouve enfouie, d'après ce plan, sous les constructions de la ville moderne.

Au sud est de l'agglomération, des chemins quittent la ville pour rejoindre le plateau du Lomont. Ces tracés sont encore discernables dans la microtopographie sous la forme soit d'un creux pour l'axe noté (7), soit d'un talus pour l'axe (8).

Le choix du figuré permet de rendre compte de l'étendue assez importante du tracé de la voirie qu'il reste encore à valider. Quelques tronçons se trouvent situés dans des zones accessibles à nos prospections (principalement en rive gauche, au nord et sur le plateau du Lomont) et des opérations de validation des tracés sont déjà en cours. La prise en compte de tous les sondages qui se sont révélés négatifs et de la datation des paléochenaux supposés (principalement dans le secteur entre le bourg de Mandeure et Courcelle (9)) permettrait peut-être de mieux appréhender l'urbanisation antique dans ces secteurs.

4.5 Reconnaissance des traces matérielles d'exploitation du milieu forestier : l'exemple des fours à chaux et des places de charbonnier

La compréhension des modalités de l'occupation rurale dans la longue durée autour de Mandeure nécessite de dresser une cartographie aussi précise et complète que possible des gisements et aménagements anthropiques dans l'espace micro-régional entourant l'agglomération.

Si les méthodes de prospection classiques (reconnaissance aérienne et au sol sur terrains labourés) sont opérantes en milieu ouvert (vallées et plaines), il n'en est pas de même sur les sommets et versants des plateaux et collines, régions naturelles marquées par l'omniprésence de la forêt et des pâtures, qui posent des problèmes spécifiques : lourdeur des procédures, difficulté à trouver des indices trahissant la présence de structures, etc. (Wichmann, 1903 ; Thuillier, 2004 ; Doyen *et al.*, 2004 ; Beck *et al.*, 2008 ; Leroy *et al.*, 2009).

La méthode aéroportée LiDAR permet dans ce domaine de nombreux développements novateurs. Plusieurs expériences, récemment menées dans différents milieux naturels (plateaux calcaires de la Forêt de Haye, plateaux argileux du centre de l'Allier, massifs anciens semi-montagneux du Morvan et de la Corrèze) ont souligné ses capacités à déceler ces microreliefs et à en dresser un plan général précis qui demanderait, avec des méthodes traditionnelles, plusieurs années de travail sur le terrain. La méthode LiDAR, par la précision de ses relevés altimétriques et son utilisation dans les parcelles forestières constitue donc désormais l'outil idéal pour une telle recherche (Sittler, 2004 ; Gallagher & Josephs, 2008 ; Kooistra & Maas, 2008 ; Leroy *et al.*, 2009).

La finesse de résolution et le caractère extensif de la prospection LiDAR permettent de cartographier certaines structures sur de grandes surfaces et d'en définir précisément la typologie. Nous avons choisi d'étudier deux structures abondantes dans nos milieux forestiers qui présentent une « signature » microtopographique facilement reconnaissable : les fours à chaux et les plateformes de charbonnier.

La production de chaux est connue depuis au moins l'Antiquité (Caton, éd. 1975). La chaux est une substance utilisée dans de nombreux domaines mais surtout connue pour son usage dans le bâtiment. Elle résulte d'une série de réactions chimiques qui vise à transformer la matière première calcaire notamment par la cuisson dans un four à chaux à des températures oscillant entre 900° et 1100° (Biston, 1828 ; Suméra et Veyrat, 1997 ; Châtelet, 2005). Cette production artisanale est restée relativement inchangée depuis l'antiquité (Châtelet, 2005).

La production de charbon de bois artisanale est elle aussi restée inchangée depuis l'Antiquité (Pline l'Ancien, éd.1962 ; Burri, 2008). Le charbon de bois, utilisé pour le chauffage et pour les industries est obtenu après cuisson du bois à l'étouffé dans une « meule » pendant une vingtaine de jours (Pline l'Ancien, éd.1962 ; Bouchey, 1969 ; Burri, 2008). Cette activité de production de combustible, indispensable au bon fonctionnement des industries métallurgiques, a connu un développement important dès le XVIIème siècle avec la création des premières forges et fourneaux, attestée dès 1634 dans la commune de Bourguignon (Courtieu, 1985 ; Lassus, 2005). A la fin du XVIIIème siècle, le charbonnage pour les forges représente environ 40% de la consommation de bois en Franche-

Comté (Lassus, 2005). La Compagnie des forges d'Audincourt, créée en 1616, allait connaître un développement régulier pour occuper le huitième rang parmi les groupes métallurgiques français au milieu du XIXème siècle. La Compagnie représentait la plus importante entreprise du pays de Montbéliard jusqu'à la première guerre mondiale (Courtieu, 1985) (fig. 225). Le charbon nécessaire à la production provenait des forêts domaniales alentours et était directement livré aux forges. La production métallurgique fut bornée à la fin du XVIIème siècle en raison de la limitation imposée pour la consommation des bois.

Il est vraisemblable que le pic d'activité de la production métallurgique ait laissé de nombreuses traces d'exploitation du milieu forestier dans le paysage actuel. Dans la zone d'étude, nous avons la chance de disposer des mémoires d'un contemporain : l'abbé Eugène Bouchey. Fils de charbonnier, il a lui même exercé un temps cette activité avant d'embrasser la carrière ecclésiastique et de devenir curé de Bonnétage. A partir de cet ouvrage, écrit au XIXème siècle, il est possible de comparer le cliché LiDAR avec les descriptions faites de cette activité en suivant le parcours de sa famille.

4.5.1 Caractéristiques morphologiques des anomalies

Les vestiges des fours à chaux apparaissent très souvent dans la microtopographie sous la forme caractéristique d'un doublet d'anomalies en creux (fig. 226). Ces dernières mesurent de 5 à 15 m de diamètre pour une profondeur d'environ 50 cm. Il apparaît quelquefois un bourrelet circulaire autour de la structure, mais la plupart n'en possède pas. Sur la figure 226, on peut apercevoir trois fours à chaux (A, B et C) chacun composés de deux anomalies. L'anomalie la plus basse est le four en lui-même (2) alors que la dépression située juste au dessus correspond au front de taille (1), au niveau de la rupture de pente, là où le calcaire affleure.

A l'intérieur des 80 km^2 de la fenêtre prospectée avec la méthode LiDAR, 76 ensembles ont été dénombrés et localisés précisément par rapport au contexte géomorphologique ; ces ensembles se répartissent à peu près également sur les deux plateaux calcaires séparés par la vallée du Doubs et bien évidemment sur les affleurements de bancs calcaires.

S'agissant des places de charbonnières, elles apparaissent en beaucoup plus grande quantité, 848 au total, sous l'apparence de semis de plateformes d'une petite dizaine de mètres de diamètre aisément identifiables sur le modèle de relief ombré (fig. 227).

4.5.2 Répartition spatiale des anomalies et relation avec leur environnement

L'origine de chaque anomalie LiDAR susceptible de matérialiser soit un four à chaux soit une place de charbonnière n'a pas été bien sûr systématiquement contrôlée au sol.

Cependant d'après la carte qui montre leur répartition, les places de charbonnières et les chaufours sont généralement implantés dans les mêmes zones géographiques (fig. 228, 229 et 230). Cette réalité pose en filigrane le problème de la concurrence entre ces différentes activités, notamment dans la gestion du combustible dans l'hypothèse où elles auraient fonctionné aux mêmes périodes.

Afin de caractériser la distribution spatiale de ces structures, nous nous sommes intéressés à plusieurs paramètres précisant l'environnement dans lequel ces structures sont implantées : la couverture géologique, la nature de l'occupation actuelle du sol, le degré et l'orientation de la pente, la distance qui les sépare de leur voisin le plus proche et le lieu-dit dans lequel elles sont installées.

4.5.2.1 Répartition des anomalies suivant l'occupation du sol

Actuellement, sur les 76 fours à chaux dénombrés à l'intérieur de la fenêtre LiDAR, un se situe sur des terres arables (données Corine land Cover), six sur des prairies, un en zone agricole et le reste se situe sous couvert boisé. Sur les 848 places de charbonnières, trois sont en zone urbaine, un en zone industrielle, deux en terre arable, douze en prairie et le reste sous couvert boisé (feuillus, conifères) (fig.231).

La répartition de ces structures par rapport à l'occupation du sol au XIXème siècle, obtenu à partir du dépouillement du registre du cadastre est très différente (fig. 232). Les fours à chaux se distribuent majoritairement (57%) dans les zones boisées et à 40% dans les zones ouvertes (pâture, pré, pré bois, labour etc.). Dans ces zones ouvertes, certaines occurrences de four à chaux sont situées loin des limites forestières du XIXème. Cette implantation, à première vue éloignée d'une des matières premières nécessaires au fonctionnement d'une telle installation, le bois, pose plusieurs questions. Les fours à chaux détectés pourraient appartenir des périodes différentes, en supposant bien sûr que ces structures sont implantées préférentiellement en forêt. Sinon, elle suggérerait une pratique différente ne nécessitant pas d'implanter ces structures sous couvert boisé, comme le montre le cas du four à chaux découvert lors des fouilles du quartier artisanal antique de « l'Essarté » (Laplaige *et al.*, 2011).

Les charbonnières se situent presque exclusivement sous couvert boisé (83%) et à 13% en zone ouverte et toujours en lisière de forêt. Cette position est conforme avec l'implantation connue de ces structures dans les bois ou en lisière (Bouchey, 1969 ; Burri, 2008).

4.5.2.2 Répartition des anomalies suivant la topographie et la géologie

En ce qui concerne l'étude du degré et de l'orientation des pentes, nous avons ré-échantillonné les MNT en cellules de 10 x 10 m afin de nous affranchir des micros ondulation du terrain. Lorsque l'on examine le gradient des pentes de la zone après le ré-échantillonnage, on note que ces dernières ont une valeur variant de 0 à 58° avec une moyenne de 8,75° et une déviation standard de 7,97°.

Les charbonnières sont implantées sur des pentes variant de 1,2 à 31° avec une moyenne de 13,1° et une déviation standard de 6,3°. Les fours à chaux sont implantés sur des pentes allant de 1,4 à 26,7° avec une moyenne de 9,5° et une déviation standard de 5,2°. Ces quelques données statistiques montrent bien que ces structures sont situées préférentiellement sur les zones légèrement pentues mais avec une inclinaison qui n'excède jamais 30°.

La répartition des charbonnières suivant l'orientation des pentes a été étudiée. Les résultats, exprimés en pourcentage, sont présentés sur la figure 233. Sur ce graphique en toile d'araignée (radar), sont figurées la distribution des pentes sur l'ensemble de la zone, celle des pentes situées sous couvert

boisé au XIXème et celle des charbonnières suivant leurs orientations préalablement classifiées en huit groupes. On n'observe pas ou peu de différence entre la répartition des pentes sur l'ensemble de la zone et celle des massifs forestiers du XIXème siècle qui concentrent l'essentiel des charbonnières (cf. 4.5.2.1). La répartition de ces dernières suivant le sens de la pente diverge pour cinq directions : NO et SE où la concentration des charbonnières est anormalement élevée, NE et E et dans une moindre mesure SO où cette concentration est faible. L'orientation de la pente semble donc être un facteur déterminant dans l'implantation des sites. La protection du site par rapport aux vents dominants est un facteur qui n'a sûrement pas été négligé : cette dernière est indispensable pour « la bonne conduite au feu et éviter les l'inflammations de la meule» (Bouchey, 1969 ; Burri, 2008). Les directions d'origines des vents dominants mesurées à Montbéliard sont le SO et le NE (INVS, 2006) ce qui pourrait expliquer, au moins en partie, la faible densité d'installations constatées sur les versants exposés au NE et dans une moindre mesure au SO. Toutefois, il n'existe malheureusement pas de données statistiques à long terme sur le vent à l'intérieur de notre zone d'étude. Il apparaît nécessaire de confirmer cette hypothèse par l'obtention de mesures plus précises spécifiques à ce secteur de la vallée du Doubs.

La prochaine étape consistera, par le biais d'une analyse multi variée, à intégrer d'autres facteurs déterminant l'implantation des sites de charbonnage comme l'approvisionnement en eau et la proximité des sentiers et chemins.

Les relations possibles entre le substrat (nature et superficie à l'affleurement), la localisation et la densité des fours à chaux ont aussi été étudiées. L'analyse de la distribution des fours à chaux par rapport à la carte géologique (fig. 234) montre que ces structures sont installées indifféremment sur les calcaires de l'Oxfordien moyen (J5), de l'Oxfordien supérieur (J6) et les calcaires à Astartes (J7a) et les calcaires il Cordium (J7d) du Kimméridgien inférieur. Elles se concentrent sur les calcaires à térébratules (J7c), compacts et fins, du Kimméridgien inférieur alors qu'elles « évitent » les marnes à Astartes (J7b) du Kimméridgien inférieur et les calcaires et marnes à Ptérocères (J8a) du Kimméridgien supérieur. Cette répartition non linéaire permet de s'interroger sur une prédisposition de ces substrats à accueillir des fours à chaux.

4.5.2.3 Relations entre les anomalies de même type

Pour l'étude de la dispersion de ces structures, la distance moyenne au voisin le plus proche a été utilisée (Ebdon, 1985). En moyenne, la distance entre deux points les plus proches est de 392 m dans le cas des fours à chaux et de 67 m dans le cas des places de charbonnières. Cette méthode permet de définir si ces structures sont groupées sur l'étendue de la zone de travail, si elles sont dispersées ou si elles sont réparties aléatoirement. L'algorithme de calcul compare la moyenne des distances entre les voisins les plus proches et la moyenne des distances estimées si les structures étaient réparties aléatoirement. Une valeur inférieure à -1 signifie une répartition groupée et une valeur supérieure à 1 traduit un caractère dispersé. Une valeur égale à zéro correspond à une distribution neutre et aléatoire.

Le ratio de la distance moyenne au voisin le plus proche est égal à -4,35 dans le cas des fours à chaux et à -33,8 dans le cas des charbonnières, ce qui est une valeur extrêmement forte.

Cette statistique permet de montrer que la répartition de ces deux types de structures dans l'espace considéré n'est absolument pas due au hasard mais qu'elle obéirait bien à une volonté de gérer l'espace. Toutefois, le calcul est fait sur l'étendue de la fenêtre et il est évident que ces structures se regroupent dans des zones actuellement boisées et non en champ ouvert ou en zone urbanisée. Il est donc nécessaire de redéfinir la zone de travail.

Si l'on fait ce calcul en respectant la nomenclature «forêts et milieux semi-naturels » de la base Corine Land Cover, les résultats obtenus sont sensiblement différents :

2,55 pour les fours à chaux, ce qui traduit une répartition dispersée de ces structures dans les massifs forestiers.

-19,05 pour les charbonnières, ce qui par contre traduit une répartition très groupée.

La répartition de ces deux types de structures est finalement très différente : les fours à chaux sont dispersés sous le couvert boisé actuel des plateaux, alors que les charbonnières sont concentrées dans des zones bien précises du massif forestier suggérant une utilisation de l'espace en rapport vraisemblablement avec la propriété foncière. Cette hypothèse est corroborée par les sources manuscrites qui mentionnent que, pour l'activité métallurgique, dès le XVIIème siècle, « mines et bois avaient été concédés au meilleur compte » (Courtieu, 1985). Le combustible venait des forêts domaniales, où l'on réduisait le bois en charbon. Même après l'acquisition d'une partie des forêts par une partie des forges (par exemple la forêt de Châtel), les bois de la région ne suffisaient pas à alimenter les besoins de la compagnie des forges d'Audincourt, « surtout après l'adjonction, aux forges susdites, des forges de Bourguignon et des hauts-fourneaux de Pont de Roide » (Bouchey, 1969). Ces éléments plaideraient en faveur du fait que la majorité de ces places seraient contemporaines du développement et de l'apogée de l'activité métallurgique en nord Franche-Comté, ce que confirme également la localisation des stations exploitées par les parents de l'abbé Bouchey entre 1833 et 1845 (Bouchey, 1969) (fig. 232).

4.5.2.4 relations entre charbonnières, fours à chaux et microtoponymes

Lorsque l'on analyse la relation entre microtoponymie et répartition des structures, on note que sur les 848 anomalies de plateformes de charbonnières identifiées sur l'image LiDAR, 130 se localisent dans des lieux-dits dont les appellatifs rappellent directement l'action de l'homme sur la végétation (élimination de friches, attaque massive de la forêt) au moyen de techniques mettant en œuvre plusieurs procédés (coupes, brûlis, dessouchage). De façon plus détaillée, on en dénombre précisément :

- 28 localisées dans les lieux-dits « Coteau des charbonnières, « La Charbonnière », « La Combe des Charbonnières »,

- 30 localisées dans le lieu-dit « Bois Brûlé »

- 71 localisées dans les lieux-dits « L'Essart Laval », « L'Essarte », « Aux Essartés », « Essarts Bourguignon et Vesches Cotes ».

En ce qui concerne les 76 anomalies de fours à chaux identifiées, une seule se localise dans un lieu-dit à l'appellation « Chaux Fourgs ». A l'inverse, l'image LiDAR ne révèle pas d'anomalie caractéristique de vestiges de four à chaux à l'emplacement de plusieurs lieux-dits dénommés « chaufourg ». Cette situation pourrait indiquer l'ancienneté d'une partie de ces structures. Ces structures auraient elles déjà disparues ? A l'heure actuelle, le seul retour de datation qui nous est parvenu date un four à chaux entre la fin du XVème siècle et le milieu du XVIIème siècle (465-300 cal. BP.).

4.5.3 Conclusion

Le LiDAR se révèle être un outil parfaitement adapté à la détection et à la cartographie des fours à chaux et des charbonnières. Une fois la typologie des traces matérielles bien établie, nous sommes en mesure d'accéder à un inventaire exhaustif de ces structures conservées sous forme de microrelief. A l'échelle de la zone d'étude (81 km²), un tel recensement ne peut s'effectuer qu'avec ce dispositif.

Le caractère exhaustif de l'inventaire nous autorise à entamer une analyse spatiale fine visant à étudier les relations entre la nature de l'occupation du sol, et par exemple la géologie, la topographie ou l'environnement. Toutefois, une partie de ces relations ne peuvent être établies qu'après une étude documentaire minutieuse.

La prochaine étape des travaux consistera à dater les structures afin d'analyser leur distribution (charbonnage isolé ou unité de production) en rapport avec l'habitat et l'environnement (points d'eau, affleurements, chemins).

4.6 Conclusion

Les problématiques abordées dans cette partie ont été choisies afin de balayer un champ de thématiques assez large à savoir la reconnaissance des formations alluviales quaternaires, l'étude de l'évolution du couvert végétal, la caractérisation d'habitats fortifiés, la restitution de la trame viaire et enfin la reconnaissance des traces matérielles d'exploitation du milieu forestier.

Dans la première partie, les prospections LiDAR et géophysiques ainsi que l'utilisation de tranchées de sondage ont permis de préciser la géographie des terrasses alluviales quaternaires mais aussi la position et quelquefois la chronologie des écoulements. La nouvelle carte des formations superficielles se trouve dorénavant en accord avec le plan de prévention de risque d'inondation et ouvre de nouvelles pistes quant aux relations entre l'occupation du fond de vallée aux époques pré et protohistoriques et la dynamique alluviale.

L'étude de la séquence de « Warembourg » s'est malheureusement soldée par un semi-échec à cause du très faible nombre de pollens conservés dans les sédiments, ce qui est une constante pour toutes les études palynologiques menées depuis 2001 sur le secteur de Mandeure-Mathay. Il reste toutefois trois sondages à analyser.

La méthodologie employée nous semble être une bonne approche pour découvrir un site de carottage idéal et calibrer au mieux le signal pollinique en référence aux évolutions récentes de l'occupation du sol. Ceci a été possible grâce à la recherche d'une zone marécageuse par l'analyse des microtoponymes puis à l'analyse des modifications de la couverture du sol, intervenues sur le bassin versant depuis le XIXème siècle grâce au dépouillement des archives et à l'étude des photographies aériennes.

La troisième partie a mis en valeur la potentialité de la microtopographie aéroportée LiDAR dans le cadre d'étude de sites fortifiés. Cette étude a permis de découvrir de nouveaux sites fortifiés dans une zone abondamment prospectée par le passé. Malgré tout, cette analyse a aussi révélé que les labours et l'urbanisation moderne détruisaient au fil des ans les anomalies en surface susceptibles de trahir la présence de vestiges sous le sol, ce qui était par ailleurs prévisible. Au final, grâce à sa haute résolution spatiale et à la possibilité d'appliquer un nombre important de traitements numériques adaptés (profil topographique, représentation 3D, analyses spatiales etc.) la méthode LiDAR s'avère un outil sans équivalent pour appréhender la reconnaissance des sites fortifiés en relation avec leur cadre naturel (géomorphologie, hydrographie…). Cette méthode permet une analyse fine de la morphologie de ces sites, de leur organisation et de l'implantation de leur système de défense par rapport à la contrainte topographique.

L'analyse de toutes les prospections effectuées en périphérie de l'agglomération antique, sous un regard nouveau, grâce à l'appui des données microtopographiques, a mis en évidence que la communication via les axes principaux ou secondaires, s'opère à partir d'un réseau viaire beaucoup plus dense que ne le proposaient les interprétations antérieures. Il a aussi été possible de démontrer que la rive gauche avait fait l'objet d'une viabilisation de l'espace qui ne s'est pas traduit par une occupation postérieure. Enfin, l'ajout de nouveaux points de franchissement de la rivière a rendu d'autant plus importante

l'influence du vecteur fluviatile dans l'organisation de l'agglomération. Toutefois, la connaissance précise de l'extension et de l'organisation de l'agglomération reste malheureusement confinée aux seuls espaces encore libres de construction dont une grande partie sont inscrits dans le périmètre de protection archéologique.

Les résultats présentés dans la dernière partie ont permis d'aborder différemment la question de l'exploitation du milieu forestier via deux ressources naturelles présentes sur le territoire, à savoir le bois nécessaire à la production de charbon et le calcaire, utilisé dans la fabrication de chaux. Les vestiges d'exploitation de ces ressources subsistent sous la forme de nombreuses anomalies microtopographiques aisément et rapidement détectables par le LiDAR sur de grandes surfaces. Cette aptitude concourt à dresser un inventaire complet de ces structures et à en définir une typologie, deux éléments indispensables à leur approche quantitative.

Dans ce même domaine de l'exploitation des ressources naturelles, un travail comparable pourrait être engagé sur d'autres activités dont les structures sont identifiables sur le LiDAR ou attestées dans la microtoponymie (par exemple les ferriers, les carrières et les lavières).

La reconnaissance extensive des structures agraires, furtivement abordée dans certains chapitres, justifie à elle seule une étude spécifique qui exploiterait avec SIG les données vectorisées du cadastre ancien, les photographies aériennes, la microtoponymie et les données microtopographiques issues de la prospection LiDAR.

Conclusion et perspectives

Ce travail, financé par le CNRS, le Pays de Montbéliard Agglomération et la région Franche-Comté dans le cadre d'une allocation BDI (Boursier Doctorant Ingénieur), avait pour objectif de comparer différents signaux utilisés dans l'étude des dynamiques naturelles et anthropiques. Cette comparaison devait également aboutir à l'élaboration de données utiles à la compréhension des modalités de l'occupation du sol, sur une longue période, dans une zone centrée sur l'antique *Epomanduodurum* (Mandeure-Mathay, Doubs). Antérieurement à ce travail, les investigations non destructives opérées sur ce site et son environnement proche avaient fourni un large panel de données qui avaient permis d'étudier dans la longue durée les dynamiques de l'occupation humaine et le fonctionnement de la plaine alluviale du Doubs.

A l'issue de cette thèse, une superficie de 81 km² a été prospectée à divers degrés, c'est pourquoi les conclusions générales de cette thèse sont examinées sur deux plans : méthodologique et archéologique. En premier lieu, les enseignements méthodologiques regrouperont les codes et les algorithmes développés au cours de ce travail. Puis les enseignements archéologiques reprendront les résultats les plus significatifs obtenus dans cette étude.

Cette partie se conclura sur la pertinence de l'utilisation de méthodes de prospection employées seules ou conjointement et sur la manière de les ordonner et de les intégrer dans nos recherches.

Enseignements méthodologiques

Concernant la représentation des données, la combinaison du « Sky View Factor » SVF et du « Topographic Position Index » (TPI) permet, selon nous, d'appréhender le plus grand nombre d'anomalies de forme et de taille variées. A l'inverse, le traitement « conventionnel », présenté dans la grande majorité des publications est le modèle ombré simple (Bewley *et al.*, 2005 ; Gallagher & Josephs, 2008 ; Howard *et al.*, 2008). Même s'il ne s'avère pas le plus performant pour détecter des structures (problèmes d'orientation, de contrastes), ce modèle reste le moyen le plus approprié à la perception visuelle des structures par un œil profane. Il a donc à ce titre assez souvent été utilisé pour présenter les résultats.

Dans le cadre de ce travail, des difficultés méthodologiques, relatives au traitement et à l'interprétation des données, qu'il a fallu surmonter, ont été rencontrées.

La qualité du « Modèle Numérique de Terrain » MNT, fourni par la société Aérodata, devait être vérifiée grâce à la comparaison avec d'autres modèles. Pour ce faire, un système de filtrage des points bruts a été développé afin de générer un MNT (cf. 2.2.2.3.2 et annexe C). Cet algorithme, présenté en annexe, est uniquement destiné à filtrer et à isoler les points du sol. Facile d'emploi, peu gourmand en ressources, il fournit des modèles numériques d'une qualité comparable à ceux générés par des systèmes plus complexes (Axelsson, 1999).

Afin d'assurer une continuité dans la restitution du contour des formations alluviales, nous avons été amenés à concevoir un MNT basé sur une nouvelle approche : l'analyse par « bandelettes » (cf.

2.2.2.3.3). Cette dernière vise à générer un modèle du fond de vallée avec une altitude constante pour le cours de la rivière principale. Cette méthode s'avère un outil adapté à la reconnaissance et à la cartographie des structures alluviales quaternaires (fig. 55) du fait de la possibilité de créer des coupes à l'envi et la normalisation de l'altitude par rapport au cours du Doubs.

Afin de détecter et interpréter un maximum d'anomalies microtopographiques, trois systèmes de visualisation des données LiDAR ont été mis au point (cf. 2.2.2.3.3).

Pour améliorer la lisibilité des images issues de la fonction «pente », un ombrage simple a été ajouté afin de discriminer au premier coup d'œil les anomalies en creux de celles en élévation (fig. 66).

Au départ, nous cherchions à utiliser un modèle de relief local « LRM », apte à détecter des structures ponctuelles ou linéaires en creux ou en élévation. Le modèle de LRM (obtenu par un filtre Gaussien) retenu dans la plupart des cas avait tendance à manquer de souplesse. C'est pour cela que nous avons utilisé un système dérivé d'un outil employé pour travailler sur des modèles décamétriques à hectométriques, le TPI (Jenness, 2006). Du fait des ajustements effectués, principalement au niveau de la taille et de la forme de la maille d'interpolation, le TPI s'intègre tout à fait dans la palette d'outils utilisés pour la reconnaissance d'anomalies microtopographiques (fig. 71).

Enfin, dans le but de fusionner les données microtopographiques et les données géophysiques, un troisième système a été développé, dénommé « comparateur de résistivité et d'indice de position topographique » (CripT). Ce comparateur CripT est très utile pour identifier et interpréter les structures électriquement résistantes dont la présence dans le sous-sol affecte également le modelé du terrain. Ce type de représentation des données mériterait d'être plus largement développé à l'avenir, car il permet de visualiser simultanément les variations du relief en association avec les contrastes mesurés dans les propriétés physiques du sol (fig. 74, 75). L'utilisation de cet outil permet de se rendre compte immédiatement des différences, parfois considérables, dans l'image de l'occupation du sol restituée par les méthodes externes et par les méthodes internes.

Enseignements géo-archéologiques

Seuls les enseignements de portée générale, relatifs soit à la reconnaissance des environnements dans lesquels les structures sont enfouies soit à la détection des structures elles-mêmes, seront soulignés dans cette partie.

Sur le plan géologique, ce travail a permis d'une part de cartographier précisément les formations superficielles de la plaine alluviale de ce secteur de la rivière et d'autre part de reprendre toutes les anciennes données de prospection sous un regard nouveau grâce à la prospection LiDAR (cf. 3.2.3 et 4.1). Les résultats concourent à définir un cadre géomorphologique plus assuré pour l'analyse des relations entre l'homme et la rivière aux périodes pré-protohistoriques et antique. Dans le domaine de la prise en compte de l'aléa naturel, la reconnaissance du réseau hydrographique ancien de la plaine du Doubs, sur près de 6 km entre Pont-de-Roide et Mandeure, associé à un enregistrement des processus sédimentaires et à une couverture microtopographique à haute résolution, forment

maintenant une série de documents de grand intérêt dans l'optique d'améliorer la résolution de la carte de l'aléa fluvial.

Grâce à la technologie LiDAR, le nombre de sites archéologiques connus dans les espaces boisés du nord Franche-Comté et dans la forêt de Chailluz a considérablement augmenté (Daval & Fruchart, 2011) (cf. 3.1.1). L'utilisation des méthodes de prospections, de la plus à la moins intégrantes, a permis de découvrir les sites, de caractériser leur environnement proche, de préciser leur organisation et enfin d'apporter des éléments de datations. A l'avenir, nous comptons poursuivre la reconnaissance de ces sites à l'aide de nouvelles méthodes capable de caractériser leur environnement proche et de délimiter leur extension par la mesure de la susceptibilité magnétique et des taux de phosphate.

Par ailleurs, sous ce type de couvert, les différentes études thématiques ont donné lieu à la découverte de nombreuses structures inédites en rapport avec l'exploitation des ressources naturelles comme le bois ou le calcaire et avec la fortification des sites de hauteur (cf. 4.3 et 4.5).

Dans le cas de l'approche consacrée à l'étude des fours à chaux et des charbonnières, le caractère exhaustif de leur inventaire nous a autorisé à entamer une analyse spatiale fine de leur implantation en fonction de différents facteurs environnementaux (topographie, nature du substrat, sens du vent etc.).

Dans la problématique des sites de hauteur, l'exploitation des données LiDAR a permis de retrouver la trace des sites mentionnés dans les sources anciennes mais auparavant non localisés, de découvrir de nouveaux sites fortifiés dans cette zone déjà abondamment prospectée et, d'une manière générale, de préciser la topographie de tous les sites détectés (cf. 4.3).

Dans l'exploration des zones humides sous couvert boisé, les résultats obtenus en Lorraine démontrent que le radar-sol, moyennant une adaptation de l'équipement aux conditions de prospection, est un outil pertinent pour la caractérisation morphologique et stratigraphique de sites inondés. La précision atteinte dans la modélisation des réceptacles permet d'envisager une analyse quantitative de ces remplissages en relation avec « l'histoire » de leur bassin versant (cf. 3.1.2).

Grâce à l'acquisition des données LiDAR, nous avons pu réétudier les données de prospections acquises dans le cadre du PCR antérieurement à 2008 mais aussi confronter ces données microtopographiques aux autres données issues des prospections effectuées durant cette thèse.

A l'extérieur de l'agglomération antique, les prospections réalisées ont permis de cartographier trois sites avec précision : un habitat rural isolé et deux sites fortifiés. Grace au mobilier recueilli, il a été possible de proposer des durées d'occupation pour deux d'entre eux (cf. 3.2).

La topographie de l'agglomération antique a été légèrement modifiée grâce aux prospections (cf. 3.3). Tout d'abord, il a été possible de démontrer que la communication via les axes principaux ou secondaires s'opérait à partir d'un réseau viaire beaucoup plus dense que ce que les interprétations antérieures avaient proposé (cf. 4.4). De plus, l'ajout de nouveaux points probables de franchissement de la rivière a rendu d'autant plus importante l'influence du vecteur fluviatile dans l'organisation de l'agglomération. Au sud de celle-ci, l'importance de l'activité de production céramique et l'organisation

du quartier artisanal antique de l'« Essarté » ont pu être révisées (cf. 3.3.1). Une bipolarité du quartier a été mise en évidence avec un secteur est et un secteur central concentrant la majorité des foyers alors que les fours et le secteur ouest semblaient moins dévolus aux activités artisanales. La nécropole Age du Bronze, située juste au nord des installations artisanales antiques, a connu une prolongation de sa durée d'utilisation jusqu'à la Tène à partir de la découverte de nouveaux enclos quadrangulaires. La présence de ces enclos tardifs pourrait peut-être expliquer l'absence de structure artisanale à cet endroit. Cette nouvelle zone d'inhumation, ajoutée à celle fouillée à 500 m au sud aux « Longues Raies » en 1996 (Barral, 1996), pose la question de l'occupation de ce secteur de la vallée du Doubs au cours de la protohistoire.

L'occupation antique, aussi bien en rive gauche qu'en rive droite, est désormais mieux connue (cf. 3.3). Le tissu urbain apparaît moins dense dans certains secteurs comme par exemple celui des « Combolles » qui a été viabilisé mais très peu loti. Enfin, et c'est sûrement l'exemple le plus spectaculaire de complémentarité des différentes méthodes de prospection, un nouveau plan du grand sanctuaire des « Cloux du Château », plus en accord avec le relevé des découvertes anciennes (cf. 3.3.9) a pu être proposé. Ce nouveau plan, aux axes de construction d'orientations distincts, interroge sur la chronologie de l'édification des différentes parties du monument et sur les relations entre ce grand sanctuaire et les autres édifices monumentaux inclus dans le grand complexe cultuel.

Un moyen de prévoir à priori l'efficience d'une prospection ?

Il est largement admis que les méthodes de prospection sont susceptibles de fournir des données archéologiques sur l'occupation du sol et/ou l'exploitation du territoire. Toutefois, il existe naturellement des facteurs qui conditionnent le rendement et/ou la qualité des résultats.

Nous avons toujours tenté de prospecter dans des conditions optimales. Par exemple, les prospections LiDAR ont été effectuées en avril, époque où la végétation est minimale et où la surface du sol n'est plus couverte de neige. Les prospections électriques se sont déroulées la plupart du temps au printemps où à l'automne, période où le sous-sol, sensé être gorgé d'eau, assure le meilleur contraste entre les structures et le milieu encaissant.

Dans ce travail, des structures de tailles, de formes et de natures variées dans différents milieux ont été prospectées. Nous avons essayé d'adapter, dans la mesure du possible, nos protocoles d'acquisition à la diversité des structures recherchées et aux spécificités des milieux explorés. De nombreux ouvrages et articles traitent très précisément de ces difficultés à l'échelle d'un site ou de l'emploi raisonné d'une méthode en particulier (Scollar *et al.*, 1990 ; Deletang, 1998 ; Camerlynck, 2005 ; Dabas *et al.*, 2006 ; Opitz, 2008 ; Ernenwein & Hargrave, 2009), mais peu abordent la question des approches combinées de méthodes en relation avec les problématiques archéologiques.

Malgré le soin constant appliqué lors des prospections effectuées, les résultats se sont avérés variables en fonction de la structure recherchée dans un contexte donné (fig. 177). Prenons l'exemple du site de l'« Essarté » (cf. 3.3 et fig. 134) où des enclos circulaires, parfaitement visibles en prospection géophysique et en photographie aérienne, sont totalement indétectables en microtopographie LiDAR.

Cet exemple n'est pas le seul dans le fond de vallée où le LiDAR ne fournit que peu d'informations sur les structures ponctuelles mais, par contre, révèle des structures linéaires en relation avec le parcellaire.

Pourtant, c'est dans ces zones ouvertes du fond de vallée que la meilleure résolution (en pts/m² cf. fig. 49 et 51) du LiDAR est observée et que les concentrations des vestiges sont les plus fortes (fig. 235). L'absence de détection dans ce cas est principalement due à l'action de l'agriculture moderne, détruisant au fil des labours, les traces susceptibles de matérialiser la présence des vestiges enfouis. Une autre cause possible est liée aux conditions d'enfouissement des vestiges comme c'est le cas à l'extrémité nord de la boucle et dans quartier artisanal de « Faubourg de Pont » (fig. 137, 138, 139, 153, 235), où un recouvrement limoneux nivèle, postérieurement à l'abandon du site, les irrégularités du relief.

Les conditions de fossilisation, c'est-à-dire la taphonomie, impacte directement la qualité des résultats du LiDAR et ceux basés sur la détection des « shadow marks » via le paramètre mesuré, à savoir l'altitude. C'est le paramètre le plus sensible aux effets induits par l'érosion et le recouvrement, qui « gomment » où « masquent » les traces matérielles des structures. Les autres méthodes de prospection sont aussi affectées mais dans une moindre mesure car les principes sur lesquels elles se fondent ne sont pas directement touchés par l'érosion et le recouvrement. Ces deux phénomènes compliqueront la détection par l'atténuation des contrastes dans les propriétés physiques mesurées (résistivité, anomalie phytographiques etc.) voire provoqueront leur disparition, comme en témoignent les prospections électriques de « Faubourg de Pont » (cf. 3.3.2, fig. 137, 138) où le recouvrement limoneux de la partie SO limite progressivement la détection fine des vestiges au fur et à mesure de son épaississement vers le sud.

Toutefois, même si la taphonomie conditionne en grande partie la qualité des résultats, il faut se garder de généraliser ces constats à l'extrême. La prospection LiDAR, par sa capacité à couvrir rapidement de très grandes surfaces, peut réserver de « bonnes surprises ». C'est le cas du grand sanctuaire des « Cloux du Château » (cf. 3.3.9, fig. 168 à 175) où le LiDAR, en détectant le troisième mur nord du *porticus duplex* dans un petit bosquet, a entrainé la révision totale du plan de cet édifice monumental.

En conclusion, les diverses méthodes de prospection ont des « zones d'application préférentielles », c'est-à-dire des zones où la qualité et la résolution des données ainsi que les conditions de conservation des structures permettront, en théorie d'obtenir les meilleurs résultats. Schématiquement, ce constat était prévisible, en effet les espaces boisés sont plus profitables aux prospections microtopographiques que les zones de plaines. La prospection pédestre ainsi que les photographies aériennes sont les plus performantes sur les sols labourés car l'action de la charrue fait remonter du matériel en surface (Ferdière, 2006) d'autre part la végétation plantée sur ces sols est très sensible au stress hydrique (Chevallier, 1964). Il faut toutefois garder à l'esprit que, dans ces deux cas, les labours modernes peuvent aussi détruire les structures ou les couches que l'on cherche à découvrir, jusqu'à rendre certaines méthodes de prospection inopérantes (Ferdière, 2006). La prospection géophysique, quant à

elle, s'accommode de la plupart des conditions environnementales en zone ouverte puisque le principe de sa détection n'est subordonné qu'à l'existence d'un contraste dans le sous-sol.

Les progrès méthodologiques intervenus ces dernières années dans la reconnaissance et l'enregistrement des vestiges avec l'apparition de la photographie numérique, les développements dans l'instrumentation géophysique ainsi que l'arrivée du LiDAR sur le marché, offrent la possibilité d'appréhender la reconnaissance de la plupart des surfaces, il est toutefois opportun d'effectuer quelques ajustements au niveau de la mise en œuvre et des traitements. Il serait dès lors dommage de ne pas utiliser l'éventail des méthodes mis à notre disposition au prétexte que les conditions optimales de leur application ne soit pas totalement remplies.

Vers une combinaison et un enchainement idéal et raisonné des prospections ?

Même si les prospections présentées dans ce travail ont été utilisées dans une optique géoarchéologique, ces dernières intéressent en réalité plusieurs thématiques. Des études épidémiologiques et urbanistiques ont été développées à partir des données LiDAR acquises dans le cadre du LIEPPEC, les orthophotographies sont utilisées par les services d'urbanisme et les méthodes de prospection géophysique de surface sont utilisées dans les domaines de l'aménagement et de l'agriculture de précision (Dabas *et al.*, 1989).

En résumé, les mêmes méthodes de prospections intéressent plusieurs domaines. Ce sont en fait ces derniers qui commandent parfois la stratégie de recherche par le choix d'une maille d'acquisition plus ou moins fine ou une profondeur d'investigation plus ou moins importante. Par exemple, dans le cas de la prospection LiDAR du programme LiEPPEC, il a fallut prospecter une fenêtre intéressant à la fois les archéologues (c'est-à-dire comprenant *Epomanduodurum*) et les géographes qui travaillent sur les bordures d'agglomération modernes. A plus grande échelle, nous pouvons citer la couverture LiDAR commandée dans une optique de prévention des risques d'inondation par le Länder du Baden-Wurtemberg, qui, malgré sa résolution de un point tous les 1,5 m, a fournit des données de grande qualité pour des travaux archéologiques (Sittler, 2004 ; Hesse, 2010).

L'obligation de compromis, dans le choix des paramètres d'exploration, entre les différents partenaires scientifiques ou administratifs, permet un échange de données, de raisonnements et de processus de traitements profitables à tous les parties. Il est toutefois nécessaire de prendre ces compromis en compte dans le cadre d'une série raisonnée de prospections intéressant un ou plusieurs domaines.

Dans le cadre des prospections à finalités archéologiques, la succession idéale de prospections est assez simple à envisager si l'on se place dans le cas de fouilles programmées. Les prospections LiDAR pourraient intervenir bien en amont, en même temps que l'acquisition d'orthophotographies et l'étude de la bibliographie. Des prospections géophysiques pourraient par la suite être menées afin de caractériser le sous-sol.

Cette démarche prospective, de la plus petite à la plus grande échelle, permettrait, grâce à la production de plans et de cartes, de choisir au mieux les zones de fouilles. Mais surtout, elle aiderait à la compréhension du cadre naturel et anthropique dans lequel s'inscrivent les vestiges exhumés.

L'enrichissement mutuel entre les résultats de la fouille et ceux issus des méthodes de prospections est alors évident. La figure 235, présentant la résistivité du proche sous-sol de la majorité de la ville antique, est par exemple un document idéal pour détecter de nouvelles structures, choisir des zones de fouilles, prévoir le risque archéologique et intégrer toute excavation dans un environnement archéologique.

Même si l'investissement dans un maximum de prospections extensives peut sembler lourd et coûteux au premier abord, il génèrera des données profitables pour plusieurs années de fouilles et optimisera cette dernière. Il convient alors de s'interroger non pas sur l'ordre d'enchainement des prospections, mais plutôt sur la succession des opérations dans le cadre de programmes de recherches, qui devraient débuter par une reconnaissance fine et extensive de l'environnement.

Glossaire

Sont regroupés ici la plupart des acronymes et quelques notions liées à la géologie, l'archéologie, la géophysique et la télédétection.

Aimantation rémanente : aimantation induite dans un corps par un champ magnétique qui subsiste après la disparition de celui-ci

Anomalie : Mot d'origine grec signifiant irrégularité (d'Alembert, 1751)

« **Azimuth** » : dans le cas des traitements effectués à l'aide de Spatial Analyst, l'Azimuth correspond à l'angle entre le nord géographique et la source d'éclairage dans le sens horaire :

$$Azimuth_{rad}=(360-Azimuth°+90)*\pi/180$$

Borne Miliaire : pierre portant une inscription et destiné à marquer les distances sur le tracés des principales voies romaines

BQR : Bonus qualité recherche

Castrum : littéralement « camp romain », durant le haut Moyen Age, ce terme s'applique aux villes et villages fortifiés

Chaux : produit chimique obtenue par décomposition thermique du calcaire. Elle est utilisée dans l'agriculture (amendement des sols acides), dans l'industrie, dans le bâtiment et possède des propriétés antiseptiques

Colluvionnement : dépôt de sédiment sur les pentes ou en bas de pente, dû à l'érosion

Combe : vallée creusée au sommet et dans l'axe d'un pli anticlinal. Toutefois, dans ce secteur du nord Franche-Comté, ce terme désigne une petite vallée sèche

Conductivité électrique : aptitude d'un matériau à laisser les charges électriques se déplacer librement (inverse de résistivité électrique)

Cromlech : monument mégalithique préhistorique constitué par un alignement de monolithes verticaux formant une enceinte de *pierres levées*, généralement circulaire

Dynamique du signal : Ecart entre la valeur minimum et maximum d'une donnée.

Erosion : Ensemble des phénomènes externes qui, à la surface du sol ou à faible profondeur, enlèvent tout ou partie des terrains et structures existantes et modifient ainsi le relief

GPS : « Global Positioning System », système de géolocalisation fonctionnant au niveau mondial

Gué : endroit où l'on peut traverser un cours d'eau à pied, à dos d'animal où en véhicule

horrea : entrepôt

Krigeage : méthode d'estimation (interpolation) spatiale portant le nom de son précurseur (D.G. Krige) permettant une estimation linéaire basée sur l'espérance mathématique mais aussi sur la variance des données spatialisées. Elle se base sur le calcul et la modélisation d'un variogramme qui correspond à une appréciation de la variance en fonction de la distance entre les données.

Modèle numérique d'élévation (MNE) : représentation de l'altitude d'une zone terrestre en prenant en compte la canopée et le sursol.

Modèle numérique de terrain (MNT) : représentation de l'altitude de la surface du sol d'une zone terrestre par un calculateur numérique sous une forme adaptée à son utilisation.

Nécropole : en archéologie, ce terme correspond à un groupement de tombes

Péribole : enceinte d'un espace sacré

Pixel : provient du terme anglais « picture element » et désigne la surface élémentaire constitutive d'une image.

Pondération inverse à la distance (IDW) : méthode d'estimation (interpolation) calculant la valeur de chaque point en fonction de sa distance aux points mesurés. Plus la distance entre le point à estimer et le point de mesure est grand, plus le poids du point mesuré sera faible.

Podium : massif de maçonnerie élevé au dessus du sol et supportant un ou plusieurs édifices

Porticus duplex : double galerie

Potin : monnaie coulée et non frappée

Propylon : large passage avec colonnes

Raster : image constituée de plusieurs pixels auquel sont associées une ou plusieurs caractéristiques.

Résistivité électrique : cf. conductivité électrique

Scramasaxe : coutelas semi-long d'origine germanique

Shape : littéralement « entité », en géomatique, le shape est un objet ayant différentes propriétés.

Substrat : en géologie, le substrat désigne la roche mère. Dans le cas des prospections géophysique, le substrat correspond au matériel originel présent sous la surface du sol

Susceptibilité magnétique : faculté d'un matériau à s'aimanter sous l'effet d'un champ magnétique inducteur

Taphonomie : étude des processus naturels qui entrent en jeu dans les conditions d'enfouissement, de fossilisation et de conservation des vestiges archéologiques

« **Zenith** » : dans le cas des traitements effectués à l'aide de *Spatial Analyst*, le zenith correspond à l'angle entre la verticale et la source d'illumination :

$$Zenith_{rad}=(90\text{-}Altitude°)*\pi/180$$

Bibliographie

Ackermann F., 1999, «Airborne laser scanning-present status and future expectations», *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, t. 54, p. 64-67

Agache R., 1978, «La somme pré-romaine et romaine d'après les prospections à basse altitude», *Mémoires de la société des Antiquaires de Picardie*, t. 24, 515 p.

Aimé G., 1993, «Les abris sous roche de Bavans, Vesoul», *Mémoire de la Société d'Agriculture, Lettres, Sciences et Arts de la Haute-Saône*, Archéologie t. 3, 192 p.

Aimé G., 1998, avec les contributions du G.R.A.P.P.M et A.R.S.A.B, *Prospections archéologiques en Franche-Comté. Doubs : canton d'Amancey, Besançon ouest, Boussières, l'Isle-sur-le-Doubs, Montbéliard est et ouest, Pont-de-Roide, Quingey, Saint-Hippolyte, Valentigney ; Jura : cantons de Salins-les-Bains, Villers-Farlay ; Haute-Saône : cantons d'Héricourt ; Territoire de Belfort : canton de Danjoutin, Granvillars*, DFS de prospection, Carte archéologique de la Franche-Comté, Besançon, SRA de FrancheComté, 122 p.

Aimé G., 2000, avec les contributions du G.R.A.P.P.M et A.R.S.A.B, *Prospections archéologiques en Franche-Comté. Doubs : cantons d'Audincourt, Clerval, Montbéliard est, Pont-de-Roide, Sochaux, Valentigne*y ; Jura : cantons d'Arbois, Poligny, Salins-les-Bains ; Territoire de Belfort : cantons de Châtenois-les-Forges, Delle, Grandvillars ; Haute-Saône : canton d'Héricourt, D.F.S de prospection, Carte archéologique de la Franche-Comté, Besançon, SRA de Franche-Comté, 87 p.

Aimé G., 2002, *prospections archéologiques en Franche-Comté, Doubs : Canton d'Amancey, Besançon-sud, Boussière, Clerval, Hérimoncourt, Marchaux, Ornans Pont-de-Roide, Quingey, Saint-Hippolyte, Saint-Vit. Jura : cantons d'Arbois, Champagnole, Salins-les-Bains. Haute Saône : Canton de Gy***,** D.F.S de prospection 2001-2002. Carte archéologique de la franche-Comté, 161 p.

Aitken M., Webster G., Reeds A., 1958, «Magnetic prospecting», *Antiquity*, t. 32, p. 270-271

Astier J., 1971, *Géophysique appliquée à l'hydrogéologie*, Masson éd., 277 p.

Atkinson R., 1952, Méthode électrique de prospection en archéologie, *In* : *la Découverte du Passé*, Paris, A. Laming éd., pp. 57-70

Atkinson R. J.C., 1953, *Field Archaeology*, London, Methuer éd., 233 p.

Augé P., 1989, *la photographie aérienne dans le nord de la franche-Comté, rapport 1989*, Besançon, SRA de Franche-Comté, 62 p.

Augé P., 1990, *Rapport de prospection aérienne*, S.R.A Besançon

Aubry L., 2003, *Acquisition, traitement et restitution des données d'une reconnaissance archéologique. La ville gallo-romaine du Vieil-Evreux*, Thèse de Doctorat, Paris, Université Pierre et Marie Curie Paris VI, 242 p.

Axelsson P., 1999, «Processing of laser scanner data – algorithms and applications», *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, t. 54, p. 138-147

Barbier P., 1895, *Plan de la société d'émulation de Montbéliard au 1/1250e*

Barnes D., 2002, «Using ArcGIS to Enhance Topographic Presentation», Cartographic Perspectives, t.42, p. 5-11

Barral P., 1996, «La nécropole gauloise des «Longues Raies» à Mathay (Doubs). Résultats de la campagne de 1995», *Bulletin de la Société d'Émulation de Montbéliard,* t. 119, p. 193-203

Barral P. (dir.), Bossuet G., Kuhnle G., Marc J.-Y., Denajar L., Bride A.-S., Gissinger B., Jeunot L., Merle V., Mougin P., Gilles K., Lux P., 2001, *Projet Collectif de Recherche «Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, territoire et environnement», Rapport annuel d'activité 2001*, Besançon, SRA de Franche-Comté, 354 p.

Barral P., Thivet M., Bossuet G., Mougin P., Joly M., 2005, *Document final de synthèse, diagnostic sur le projet de mise en valeur des abords du théâtre antique «Champs sous la grande Planche»*, Mandeure, SRA de Franche-Comté, S.I.V.A Mandeure Mathay, INRAP Grand Est, Franche-Comté (Doubs)

Barral et al., 2007a : Barral P. (dir.), Bossuet G., Marc J.-Y., Monnier J., Thivet M., 2007, *Projet Collectif de Recherche « Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, territoire et environnement ». Rapport sur la campagne 2007, bilan 2005-2007 et programmation 2008-2010*. Besançon : Laboratoire de Chrono-écologie, 2 vol.

Barral et al., 2007b : Barral P., Jaccottey L., Pichot V., 2007, «L'agglomération de Mandeure (Doubs) et son territoire au Second âge du Fer». *In* : Barral P., Daubigney A., Dunning C., Kaenel G., Rouliere-Lambert M.J., (dir.). *Actes du XXIXe colloque international de l'AFEAF, Bienne (Suisse). L'âge du Fer dans l'arc jurassien et ses marges. Dépôts, lieux sacrés et territorialité à l'âge du Fer.* 5 – 8 mai 2005. Besançon, PUFC, vol. 1, p. 139-160

Barral P., Bossuet G., Marc J., Monnier J., Nouvel P., Thivet M., 2009, *Rapport annuel d'activité 2009 du PCR «Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, Sciences de la Terre et de l'Environnement»*, Besançon, SRA de Franche-Comté, 348 p.

Barral P., Bossuet G., Marc J., Monnier J., Nouvel P., Thivet M., 2010, *Rapport annuel d'activité 2010 du PCR «Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, Sciences de la Terre et de l'Environnement»*, Besançon, SRA de Franche-Comté, 398 p.

Barral P. (dir.), Billoin D., Blin S., Bossuet G., Dumont A., Fruchart C., Gaston C., Joan L., Kuhnle G., Laplaige C., Mamie A., Marc J.-Y., Mazimann J.-P., Monnier J., Mougin P., Nouvel P., Passard F., Piningre J.-F., Thivet M., Urlacher J.-P.†, 2011, *Mandeure, une ville sur le Doubs*, SRA – DRAC Franche-Comté, série Archéologie en Franche-Comté, t. 2, 70 p.

Beck P., Braunstein P, Philippe M., Ploquin A., 2008, «Minières et ferriers du Moyen Age en forêt d'Othe (Aube, Yonne)», *Revue Archéologique de l'Est*, t. 57, p. 333-365

Bépoix S., 2010, *Une cité et son territoire. Besançon, 1391, l'affaire des fourches patibulaires.* Annales littéraires n° 871, Besançon, Presses universitaires de Franche-Comté, 264 p.

Berranger M., 2009, *Le fer, entre matière première et moyen d'échange, en France du VII^e^ au I^er^ av. J.-C. Approches inter disciplinaires*, Thèse de Doctorat, Paris, Univeristé Paris I Pantheon-Sorbonne, 3 vol.

Beurlin P.-F., 1889, *Les Recherches historiques sur l'ancienne seigneurie de Blamont, dépendance du Comté de Montbéliard*

Bewley R., Crutchley S., Shell C., 2005, «New light on an ancient landscape: lidar survey in the Stonehenge World Heritage Site», *Antiquity*, t. 79, p.636-647

Biston M., 1828, *Manuel théorique et pratique du Chaufournier*, Paris, Roret éd., 326 p.

Billoin D., 2010, avec la collaboration de Mazimann J.-P., «L'agglomération de Mandeure (Doubs) de la fin de l'Antiquité aux premiers siècles du Moyen Âge», *In* **:** Barral P. (dir.), Bossuet G., Marc J.-Y., Monnier J., Nouvel P., Thivet M., *Projet Collectif de Recherche « Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, Sciences de la Terre et de l'Environnement », Rapport sur la campagne 2010, bilan du projet triennal 2008-2010, programmation de la campagne 2011*, Besançon, SRA de Franche-Comté, p. 33-42

Blin S., à paraître, *Architecture et décoration architecturale dans l'Est des Gaules à l'époque impériale: les monuments publics de Mandeure (Séquanie)*, Thèse de Doctorat, Lyon, université Lyon 2

Bossuet G., Ruffaldi P., Magny M., Richard H., Mouthon J., 1996, «Dynamique et approche quantitative des remplissages fini et postwürmiens du bassin lacustre de Cerin (Jura, France)», *Bulletin de la Société géologique de France*, t. 167 (4), p. 483-494

Bossuet G., Pallier C., Arcay D., Lacaze S., Chazaly B., Barral P., Begeot C., Petit., Camerlynck., Dabas M., 2001, «Recherches géoarchéologiques et paléoenvironnementales dans le secteur sud ouest du site de Mathay-Mandeure (Doubs)», *In* **:** Barral P., (dir.), Barral P., Bossuet G., Kuhnle G., Marc J.Y, Responsables d'opérations - *Projet Collectif de Recherche «Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, territoire et environnement», Rapport annuel d'activité 2002*, SRA de Franche-Comté, Besançon, p. 187-234

Bossuet G., Barral P., Begeot C., Lacaze S., Vanniere B., 2002, «Approches géoarchéologique et paléoenvironnementale dans la partie sud-ouest de la boucle du Doubs», *In* **:** Barral P., (dir.), Barral P., Bossuet G., Kuhnle G., Marc J.Y, Responsables d'opérations - *Projet Collectif de Recherche* «*Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, territoire et environnement*». *Rapport annuel d'activité 2002*, Besançon, SRA de Franche-Comté, p. 21-47

Bossuet G., Barres E., Barral P., Dumont A., Bensima L., Perrault C., Girarclos O., 2003, «Approches géoarchéologique et paléoenvironnementale dans la partie sud-ouest de la boucle du Doubs», *In :* Barral P. (dir.), Barral P., Bossuet G., Kuhnle G., Marc J-Y., *Projet Collectif de Recherche* «*Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, territoire et environnement*». *Rapport annuel d'activité 2003*, Besançon, SRA de Franche-Comté, p. 25-72.

Bossuet G., Thivet M., Marmet E., Dabas M., Mourot A., Barral P., 2004, «Prospections spécialisées, approches géo-archéologique et paléo-environnementale dans le secteur sud-ouest de la boucle du Doubs», *In :* Barral P., (dir.), Barral P., Bossuet G., Kuhnle G., Marc J-Y., Responsables d'opérations, *Projet Collectif de Recherche* «*Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, territoire et environnement*». *Rapport annuel d'activité 2004*, Besançon, SRA de Franche-Comté, p.35-97

Bossuet G., Thivet M., Marmet E., Dabas M., Lacaze S., Arcay D., Mourot A., Camerlynck C., Barral P., 2005, «Fonctionnement alluvial et aménagements anthropiques dans la boucle du Doubs et ses abords», *In :* Barral P (dir.), Bossuet G., Chevrier S., Kuhnle G., MARC J.-Y., Thivet M., Responsables d'opérations, *Projet Collectif de Recherche* «*Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, territoire et environnement*», *Rapport annuel d'activité 2005*, Besançon, SRA de Franche-Comté, p.29-115

Bossuet G., Thivet M., 2006, avec le concours de Trillaud S., Chassang M., Chemin M., Favard A., Dabas M., Barral P., Begeot C., «Recherches archéologiques et paléoenvironnementales sur le site de Mathay-Mandeure», *In* Barral P. (dir.), Barral P., Bossuet G., Monnier J., Marc J.Y., Thivet M., Responsables d'opérations, *Projet collectif de recherche «Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, territoire et environnement», Rapport annuel d'activité 2006*, Besançon, SRA de Franche-Comté, p. 25-124

Bossuet G., Thivet M., 2007, avec le concours de Sarro L., Favard A., Dabas M., Nouvel P., Videau G., Mougin P., Barral P., «Etudes documentaires et recherches géophysiques», *In* : Barral P. (dir.), Barral P., Bossuet G., Marc J.Y., Monnier J., Nouvel P., Thivet M., Responsables d'opérations, *Projet Collectif de Recherche* «*Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, territoire et environnement*», *Rapport annuel d'activité 2007*, Besançon, SRA de Franche-Comté, p. 71-84

Bossuet G., Thivet M., Nouvel P., 2008, «Le pôle de Mandeure et son contexte micro-régional», *In* : Barral P. (dir.), Bossuet G., Marc J.-Y., Monnier J., Nouvel P., Thivet M., *Projet Collectif de Recherche « Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, Sciences de la Terre et de l'Environnement ». Rapport intermédiaire sur la campagne 2008,* Besançon, SRA de Franche-Comté, p. 33-62

Bossuet G., Laplaige C., Thivet M., Nouvel P., 2009, «Le pôle de Mandeure et son contexte micro-régional», *In* : Barral P. (dir.), Bossuet G., Marc J.-Y., Monnier J., Nouvel P., Thivet M., *Projet Collectif de Recherche « Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, Sciences de la Terre et de l'Environnement ». Rapport intermédiaire sur la campagne 2009,* Besançon, SRA de Franche-Comté, p. 33-98

Bossuet G., Laplaige C., Nouvel P., 2010, «Le pôle de Mandeure et son contexte micro-régional», *In* : Barral P. (dir.), Bossuet G., Marc J.-Y., Monnier J., Nouvel P., Thivet M., *Projet Collectif de Recherche « Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, Sciences de la Terre et de l'Environnement », Rapport sur la campagne 2010, bilan du projet triennal 2008-2010, programmation de la campagne 2011*, Besançon, SRA de Franche-Comté, p. 89-154

Bouchey E., 1862, *Recherches historiques sur la ville, la principauté et la république de Mandeure*, Besançon, 2 vol.

Bouchey E., 1969, *Le charbonnier dans les bois*, la Citadelle éd., Folklore Comtois,134 p.

B.R.G.M, 1973, *Carte géologique n°474 (Montbéliard),* 1 :50000, B.R.G.M éd, Orléans

B.R.G.M, 2001, *Carte géologique n°195 (Château-salins),* 1/50 000. B.R.G.M éd, Orléans

Buchsenschutz O., Gandini C., Maussion A., 2004, «L'achéologie à la conquète de l'espace : les « cartes à pois » et le poids des cartes, de la carte archéologique au système d'information géographique», *Revue d'archéométrie*, t. 28, p. 5-14

Bufton, J., Garvin J., Cavanaugh J., Ramos-Izquierdo L., Clem T., Krabill W., 1991, «Airborne lidar for profiling of surface topography», *Optical Engineering,* t.30, p. 72-78

Burri S., 2008, «Enquête ethnoarchéologique sur le mode de vie et le savoir-faire des derniers charbonniers de Calabre (Italie) : entre tradition et modernité», *In* : Boutet A., Defrasne C., Lachenal T. (dir.),*Cultures, Economies, Sociétés et Environnement du début de la Préhistoire au Moyen-Age : travaux en cours,* Actes de la troisième table ronde des jeunes chercheurs en archéologie de la MMSH, Aix-en-Provence, 6 juin 2008

Burrough P., McDonnell R., 1998, *Principles of Geographical Information Systems*, Oxford, Oxford University Press éd., 352 p.

Camerlynck C., 2005, «Principes et mise en œuvre de la méthode radar», *dossiers Archéologie et sciences des origines*, t. 308, p. 72-73

Campy M., Thevenin A., 1978, «La basse terrasse du Doubs dans la région de Pont-de-Roide : esquisse chronologique et néotectonique dans le Jura septentrional», *Bulletin de l'Association française pour l'Etude du Quaternaire,* 1978, p. 155-160

Cantrelle S., 1989, *Mathay. Essarté. Rapport annuel 1989*, Besançon, SRA de Franche-Comté, 20 p.

Cantrelle S., 1990, *Mathay. Essarté. Sauvetage programmé. Rapport intermédiaire 1990*, Besançon, SRA de Franche-Comté, 13 p.

Castan A., 1882, «les nouvelles fouilles de Mandeure», r*evue Archéologique,* t. 43(2), p. 264-274

Caton l'ancien, *De agricultura*, Les Belles Lettres éd., Paris, 1975, 342 p., 8 fig.

Challis K., Kokalj Z., Kincey M., Moscrop D., Howard A.-J., 2008, «Airborne lidar and historic environment records», *Antiquity*, t. 82, p. 1055-64

Chaplot V., Darboux F., Bourennann H., Leguédois S., Silvera N., Phachomphon, K. 2006, «Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density», *Geomorphology,* t. 77, p. 126-141

Châtelet, M., 2005, «Un deuxième four à chaux Mérovingien découvert en Alsace: le four de Sessenheim «Hecklen» (Bas-Rhin)», *Revue Archéologique de l'Est*, t. 54, p. 349-364

Chauve P., Martin J., Bailly C., 1985, *Carte géologique n°475 (Delle), 1 :50000,* B.R.G.M éd, Orléans

Chauve A., Vega C., Bretar F., Durrieu S., Allouis T., Pierrot-Deseilligny M., Puech W., 2009, «Processing full-waveform lidar data in an alpine coniferous forest: assessing terrain and tree height quality», *International Journal of Remote Sensing*, t. 30, p.5211-5228

Chevallier R., 1964, *L'avion à la découverte du passé*, Paris, Fayard éd., 221 p.

Chevrier S., 2009, «Les enceintes pré-médiévales du Nivernais-Morvan: de la documentation ancienne aux prospections récentes», *Revue Archéologique de l'Est*, t. 58, p. 133-174

Childs C., 2004, «Interpolation surfaces in ArcGIS spatial analyst», *ArcUser,* July-September 2004, p. 32-35

Chouquer G., 1996, *Les formes du paysage, tome 1- Etudes sur les parcellaires*, Paris, Errance éd, 3 vol.

Chouquer G., 2000, L'étude *des paysages. Essais sur leurs formes et leur histoire*, Paris, Errance éd, 208 p.

Chouquer G., 2008, *Traité d'archéogéographie. La crise des récits géohistoriques*, Paris, Errance éd, 200 p.

Conyers L., Goodman D., 1997, *Ground-Penetrating Radar, An Introduction for Archaeologists*, Altamira Press éd., 232 p.

Courtieu J., 1985, *dictionnaire des communes du département du Doubs*, Cêtre éd., 6 vol.

Coûteaux M., 1969, «Formation et chronologie palynologique des tufs calcaires du Luxembourg Belgo-Grand-Ducal», *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, t. 20, p.179-206

Crosilla F., Visintini D., Prearo G., 2004, «A robust method for filtering non ground measurements from airborne LiDAR data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,* t. 35, p. 196-201

CTHS, 2009, *Paysages, 135e congrès national des sociétés historiques et scientifiques, Neuchâtel, Faclté des lettres et sciences humaines, université de Neuchâtel, 6-11 avril 2010, programme d'appel*, CTHS éd, 63 p.

Dabas M., Ducomet G., Hesse A., Jolivet A., Tabbagh A., 1989, «Intérêt de la cartographie de la résistivité électrique pour la connaissance du sol à grande échelle», *Science du sol*, t. 27(1), p. 65-68

Dabas M., Aubry L., 1997, *Le site du champ des cloux du château, Mandeure (Doubs), Prospection magnétique*, Rapport Terra Nova 1997, Paris, réf. 37, 6 p.

Dabas M., Aubry L., David C., Hovhannisyan G., Naizet F., 1999, *Etude d'impact archéologique. Liaison routière RD438/RN437 (Mathay-Mandeure, Doubs). Prospections géophysiques par méthode électrique et magnétique,* Rapport Terra Nova 1999, réf. 81, 17 p.

Dabas M., Guyard L., Lepert T., 2005, «*Gisacum* revisité. Croisement géophysique et archéologie», *Dossiers Archéologie & sciences des origines*, t. 308

Dabas M., Deletang H., Ferdière A., 2006, *La prospection*, Paris, Errance, 248 p.

Dassié J., 1978, *Manuel d'archéologie aérienne*, Paris, Technip éd., 327 p.

Daval D., Fruchart C., 2011, avec la collaboration de Favory F., Nuninger L., Barral., Bossuet G., Laplaige C., *Besançon et environs (25) Prospection et validation de données LiDAR*, Rapport d'opération de prospection inventaire, Besançon, SRA de Franche-Comté

Delafosse W., 1948, «De l'origine des Mardelles de Lorraine», *Extrait des Mémoires de l'Académie Nationale de Metz*, t. 11, p. 1-23.

Delétang H., 1998, «La prospection aérienne à basse altitude», *In :* Ferdière A., *La prospection*, Errance éd., collection «Archéologiques» dirigée par Alain Ferdière, p. 91-128

Delor J.P., 1988, *Fouilles Delor - 1988. Mathay. L'Essarté. Rue de la gare.*, S.R.A. Besançon, 28 p.

Delor J.P., Rolley C., 1995, **«**La nécropole de Gurgy **«**La Picardie**»** (Yonne)**»**, *Mémoires de la Société Archéologique Champenoise*, t. 15, p. 341-358

De Nayer F., Pozzi J.-P., Tabbagh A., 1979, «Les propriétés physiques des sols», Les dossiers de l'archéologie, t. 39, p. 22-25

Devereux B.J., Amable G., Crow P., Cliff A., 2005, **«**The potential of airborne lidar for detection of arcaeological features under woodland canopies**»**, *Antiquity*, t. 79, p. 648-660

Devereux B.J, Amable G., Crow P., 2008, «Visualization of LiDAR terrain models for archaeological feature detection», *Antiquity*, t. 82, p. 470-479

Doneus M., Briese C., Fera M., Janner M., 2008, «Archaeological prospection of forested areas using full-waveform airborne laser scanning», *Journal of Archaeological Science*, t.35, p. 882–893

Doyen B., Decocq G., Thuillier P., 2004, «Archéologie des milieux boisés en Picardie», *Revue Archéologique de Picardie*. t. 1-2, p. 149-164.

Dunod J-M., 1709, *La découverte entière de la villa d'Antre en Franche-Comté qui fait changer de face à l'histoire ancienne, civile et ecclésiastique de la même province et des provinces voisines*, Amsterdam, p. 175-181

Dupouey J.L., Bachacou J., Cosserat R., Aberdam S., Vallauri D., Chappart G., Corvisier-de Villèle M.A., 2007, «Vers la réalisation d'une carte géoréférencée des forêts anciennes de France», *Le monde des Cartes*, t. 191, p. 85-98

Durand A., 2003, *Les paysages médiévaux du Languedoc (Xe-XIIe siècles)*, Toulouse, PU Mirail éd., collection Tempus, 491 p.

Duvernoy C., 1867, «Exposé sur la situation et les travaux de la Société pendant les années 1865, 66 et 67 (séance du 3 mai 1866)», *Mémoire de la société d'émulation de Montbéliard 1867*, t. 2 (2), p. 8-33

Duvernoy C., 1875, «Notice sur le pays de Montbéliard antérieurement à ses premiers comtes», *Mémoire de la société d'émulation de Montbéliard 1875*, t. 4 (2), p.1-165

Duvernoy C., 1880, «Dernières fouilles à Mandeure», *Revue d'Alsace*, t. 9, p. 145-170, 1 pl.

Duvernoy C., 1882, «Mandeure 1882-1883», *Mémoires de la société d'émulation de Montbéliard 1881*, t. 3, p. 114-127

Duvernoy C., 1883, «Notice sur une enceinte récemment découverte à Mandeure», *Mémoires de la Société des Antiquaires de France*, t. 4 (5), p. 29-44

Ebdon D., 1985, *Statistics in Geography*, Wiley-Blackwell ed., 240 p.

Emonnot G., à paraître, *Histoire de Mathay : les vignes, les travaux des champs, le pâturage, la glandée, les bois et la chasse*, Mathay, Emonnot G. éd.

Enters D., Lücke A. and Zolitschka B., 2006, **«**Effects of land-use change on deposition and composition of organic matter in Frickenhauser See, northern Bavaria, Germany», *The Science of the Total Environment*, t. 369, p. 178-187

Enters D., Dörfler W. and Zolitschka B., 2008, «Historical soil erosion and land-use change during the last two millenia recorded in lake sediments of Frickenhauser See, northern Bavaria, central Germany», *The Holocene*, t. 18, p. 243-254

Ernenwein E., HargraveM., 2009, *Archaeological Geophysics for DoD Field Use: a Guide for New and Novice Users*, 109 p.

Etienne D., Ruffaldi P., Goepp S., Ritz F., Georges-Leroy M., Pollier B., Dambrine E., 2011, «The origin of closed depressions in Northeastern France: A new assessment», *Geomorphology*, t. 126, p. 121-131

Etienne D., 2011, *Les Mardelles intra-forestières de Lorraine – origines, archives paléo-environnementales, évolutions dynamiques et gestion conservatoire*, Thèse de Doctorat, Nancy, Université Henri Poincaré Nancy 1, 264 p.

European Environment Agency, 2007, *CLC2006 technical guidelines*, 70 p.

Fassbinder J., Stanjek H., Vali H., 1990, «Occurrence of magnetic bacteria in soil», *Nature, t. 343,* p. 161-163

Ferdière A., 2006, «les prospections aux sols», *In* : Dabas M., Deletang H., Ferdière A. (dir.), *La prospection,* Paris, Errance éd, p. 9-77

Fichtl S., 2005, «Murus et pomerium : réflexions sur la fonction des remparts protohistoriques», *Revue archéologique du centre de la France*, t. 44, p. 55-72.

Fiétier R., **1973**, *Recherches sur la banlieue de Besançon au Moyen-Âge,* Annales Littéraires de l'Université de Besançon, Paris, les Belles Lettres, 232 p.

Flood M., 2001, «Laser altimetry - from science to commercial LiDAR mapping», *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, t. 67 (11), p.1209-1217

Folgheraiter G., 1899, «Sur les variations séculaires d'inclinaison magnétique dans l'antiquité», *Arch. Sci. Phys. Nat.*, t. 8, p. 5-16

Fontaine M.-J., 1995, *Microtoponymie de l'ancien canton de Delle (sud du territoire de Belfort)*, Thèse de Doctorat, Strasbourg, Université de Strasbourg, 5 Vol.

Fovet E., 2010, *Dynamiques socio-environnementales durant l'antiquité – Approche micro-régionale du peuplement en Languedoc oriental*, Thèse de doctorat, Besançon, université de Franche-Comté, 2 vol.

Frezouls E., 1988, «Mandeure antique», *In* : Frezoul E. (dir.), *Les villes antiques de la France. Germanie Supérieure 1. Besançon-Dijon-Langres-Mandeure*, Strasbourg, AECR éd, p. 423-505

Fruchart C., 2009, *Topographie des zones artisanales de l'agglomération antique de Mandeure-Mathay, Recherches documentaires, établissement de données, comparaisons.* Mémoire de Master 2 Archéologie, Cultures, Territoires, Environnement. Besançon, Université de Franche-Comté, 2 volumes 147 p. et 144 p., 8 pl. H.T.

Fruchart C., Laplaige C., Opitz R., Nuninger L., 2011, **«**The LIEPPEC Project : using lidar for the study of long term landscape change**»**, *Antiquity Gallery*, t. 85, fasc. 327

Gallagher J., Josephs R. 2008, «Using LiDAR to detect cultural resources in a forested environment: an example from Isle Royale National Park, Michigan, USA», *Archaeological Prospection*, t. 15, p. 187-206

Ganard V., Vaxelaire L., 1994, «Vestiges gallo-romains à Valentigney» *Mémoire de la Société d'émulation de Montbéliard*, t. 117, p. 75-85

Gaston C., 2008, *Mathay* «*Réserve d'eau brute*», Rapport de diagnostic archéologique, Besançon,INRAP

Gillijns K., Poesen J., Deckers J., 2005, **«**On the characteristics and origin of closed depressions in loess-derived soils in Europe - a case study from central Belgium**»**, *Catena*, t. 60, p. 43-58

Gilvear J., Bravard J.-P., 1993, «Dynamique fluviale», in : C. Amoros C. & Petts G., *Hydrosystèmes fluviaux*, Masson éd., coll. D'écologie, p. 61-82.

Goepp S., 2010, *Etude des mardelles de deux secteurs de la LGV sur les marnes du Keuper*, Rapport de fouille, Metz, Institut National de la Recherche Archéologique, 131 p.

Goguey R., 1976, *Rapport de prospection aérienne sur le tracé du canal Rhin-Rhône*, Besançon, SRA de Franche-Comté

Goudineau C., 1998, *Regard sur la Gaule*, Paris, Errance éd, 379 p

Grenier A., 1934, *Manuel d'archéologie gallo-romaine, deuxième partie : L'Archéologie du sol. 1 : Les Routes*, Paris, A. Picard éd., 468 p.

Guenther G., Thomas R., LaRocque P., 1996, «Design considerations for achieving high accuracy with the SHOALS bathymetric lidar system», SPIE: *Laser Remote Sensing of Natural Waters: From Theory to Practice*, t. 15, p. 54-71.

GuéguenY., Palciauskas V., 1992, *Introduction à la physique des roches*, Hermann éd., 300 p.

Guillot P., 1999, *Rapport de prospection sur les cantons de Baume-les-Dames, Rougemont, Clerval, L'Isle-sur-le-Doubs, Pont-de-Roide, Montbéliard*, SRA Franche Comté, 60 p.

Haaz F., 2009, *L'occupation antique dans la vallée du Doubs entre Bourguignon et Saint-Hippolyte (Doubs)*, Mémoire de Master 2 d'Archéologie et Histoire de l'Art, Paris, Université de Paris Sorbonne (Paris IV), 2 vol.

Herault B., Thoen D., 2008, **«**Diversity of plant assemblages in isolated depressional wetlands from Central-Western Europe», *Biodiversity & Conservation*, t. 17**,** p. 2169-2183

Herault B., Thoen D., 2009, **«**How habitat area, local and regional factors shape plant assemblages in isolated closed depressions», *Acta Oecologica*, t.35, p. 385-392

Hesse A., Bossuet G., Rémy **J., Renimel S. et Tabbagh A., 1978**, **«**Succès de l'archéologie prospective à Saint Romain en Gai**»**, *Archéologia*, t. 122, p. 7-17

Hesse A., 1985, **«**La reconnaissance archéologique sur le terrain**»**, in : A. Pelletier (dir.), *L'Archéologie et ses m*éthodes, Roanne, Horwarth éd., p. 41-61

Hesse A., 1986, *Manuel de prospection géophysique appliquée à la reconnaissance archéologique.* Dijon, Centre de recherche sur les techniques Gréco-romaines, 127 p.

Hesse A., 2005, **«**Petite histoire de la géophysique**»**, *Dossier d'Archéologie*, t. 308, p. 4-10

Hesse R., 2010, «LiDAR-derived Local Relief Models - a new tool for archaeological Prospection», *Archaeological Prospection*, t. 17 (2), p. 67-72.

Hodgson M. & Bresnaha P., 2004, «Accuracy of airborne lidar-derived elevation: empirical assessment and error budget», *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, t. 70 (3), p.331-339

Hodgson M., Jensen J., Raber G., Tullis J., Davis B., Thompson G., Schuckman K., 2005, **«**An evaluation of Lidar-derived elevation and terrain slope in leaf-off conditions», *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, t. 71, p. 817-823

Houben P., 2008, **«**Scale linkage and contingency effects of field-scale and hillslope-scale controls of long-term soil erosion: Anthropogeomorphic sediment flux in agricultural loess watersheds of Southern Germany», *Geomorphology*, t. 101, p. 172-191

Howard A., Browne A., Carey C., Challis K., Cooper L., Kincey M., Toms P., 2008, «Archaeological resource modeling in temperate river valleys: a case study from the Trent Valley, UK», *Antiquity*, t. 82, p. 1040-54

Hu Y., 2003, *Automated extraction of digital terrain models, roads and buildings using airborne LiDAR data*, PHD Thesis, Calgary, The University of Calgary

Humme A., Lindenbergh R., Sueur C., 2006, «Revealing Celtic fields from lidar data using kriging based filtering», *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium, Dresden, 25–27 September*, t. 36

Humbert S., Llopis E., 1990, «L'atelier de l'Essarté à Mathay (Doubs) : structures et approche de productions», *In :* Rivet L. *(dir.), Actes du congrès de la SFECAG, Mandeure-Mathay, 1990*, p. 47-53

INVS, 2006, *faisabilité d'une évaluation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine – agglomération de Montbéliard*, Institut de Veille Sanitaire, 23 p.

Jacob J.P., 1984, Circonscription de Franche-Comté, *Gallia, Fouilles et monuments archéologiques en France métropolitaine*, Paris, CNRS, t. 42, p. 327-338

Jacob J.P., Jeannin Y., 1986, «Circonscription de Franche-Comté», *Gallia, Fouilles et monuments en France métropolitaine*, Paris, CNRS, t.44, p. 238

Jeannin Y., 1974, **«***Contribution à une typologie de la céramique commune de Mandeure : les récipients fermés en terre fine blanche***»**, *Revue Archéologique de l'Est*, t. 25, fasc. 3-4

Jeannin Y., 1984, *Mandeure, Fouille de sauvetage dans la tranchée du gazoduc Mathay Pont-de-Roide, 1984*, Besançon, SRA Franche-Comté

Jeannin Y., 1986, «Mandeure (Doubs)», *In* : Mangin M., Jacquet B., Jacob J.P. (dir.), *Les agglomérations secondaires en Franche-Comté romaine*, Annales littéraires de l'université de Besançon, Paris, les Belles Lettres, p. 38-67

Jenness, J,. 2006, *Topographic Position Index (tpi_jen.avx) extension for ArcView 3.x, v. 1.3a*, Jenness Enterprises, available at: http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm

Jeunot L., 2001, **«**Catalogue des monnaies gauloises de Mandeure**»**, *In* **:** Barral P., (dir.), Barral P., Bossuet G., Kuhnle G., Marc J.Y, Responsables d'opérations - *Projet Collectif de Recherche* «*Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, territoire et environnement*». *Rapport annuel d'activité 2001*, Besançon, SRA de Franche-Comté, p. 257-290

Joan L., 2003, *Le Doubs et le territoire de Belfort : 25 et 90. Carte Archéologique de la Gaule*, Paris, Académie des Inscriptions et Belles Lettres, 561 p.

Kasprizk M., Nouvel P., 2011, «Les mutations du réseau routier de la période laténienne au début de la période impériale. Apports des données archéologiques récentes», *In* : Reddé M., Barral P., Favory F., Guillomet J.-P., Joly M., Marc J.-Y., Nouvel P., Nuninger L., Petit C., *Aspects de la Romanisation dans l'Est de la Gaule*, Collection Bibracte, Glux-en-Glenne, t. 21, 2 vol.

Koethe H., 1933, «Die Keltischen Rund-und Vielecktempel der Kaiserzeit», *Bericht der romisch-germanischen Kommission*, t. 23, p. 10-108

Kokalj Z., Zaksek, K., Ostir K., 2011, **«**Application of sky-view factor for the visualization of historic landscape features in lidar-derived models**»**, *Antiquity*, t. 85, p. 263-273

Kooistra M., Maas J., 2008, «The widespread occurrence of Celtic field systems in the central part of the Netherlands», *Journal of Archaeological Science*, t. 35, p.2318-2328

Krabill W.B., Collins J.G., Link L.E., Swift R.N., Butler M.L., 1984, «Airborne laser topographic mapping results», *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, t. 50, p.685-694

Kraus K. & Pfeifer N., 1998, «Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data», *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, t. 53, p. 193-203

Kuhnle G., 2005, *Mandeure, rue de la Récille, 2003*, Rapport de fouille préventive, INRAP

Kvamme K., 2001, «Current Practices in Archaeogeophysics: Magnetics, Resistivity, Conductivity, and Ground Penetrating Radar», *Earth Sciences and Archaeology*, New York, Springer éd., p. 353-384

Lalance C., 1897, «Séance publique du 18 juin 1896 : Discours d'ouverture par M. Ch. Lalance, Montbéliard», *Mémoires de la Société d'Emulation de Montbéliard*, t. 26, p. 1-3

Laplaige C., Fruchart C., Bossuet G., Opitz R., 2011, «Apports des prospections LiDAR, magnétiques et pédestres à la connaissance du quartier artisanal antique de « l'Essarté » (Mathay, Doubs)», *Revue archéologique de l'Est, t. 60, à paraître*

Lassus F., 2005, «Bons cousins : charbonniers des bois et cousins des villes…», *In* : Merlin P. (dir), Lassus F., Vuaillat., Ryon J.-F., Foyet C., *Bon cousins charbonniers : autour de la « société secrète », 1835*, éditions de Folklore comtois, p. 23-62

Le Borgne E., 1955, «Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel», *Annales de géophysique*, t. 11, p. 399-419

Le Borgne E., 1960, «Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol et sur celles du schiste et du granite», *Annales de Géophysique*, t. 16, p. 159-195

Lemmens M., 2007, «Airborne LiDAR Sensors», *GIM International, t.* 21

Lerat L., 1960, «Circonscription de Besançon», *Gallia : Fouilles et monuments archéologiques en France métropolitaine*, Paris, C.N.R.S, t. 18, p. 247-262

Lerat L., 1968, «Les trésors de monnaies romaines en Franche-Comté», *Revue Archéologique de l'Est*, t. 19, p. 145-182

Leroy M., **Bock J.**, **Dambrine E., Dupouey J.-L., 2009**, «Le massif forestier, objet pertinent pour la recherche archéologique. L'exemple du massif forestier de Haye (Meurthe-et-Moselle)», Revue Géographique de l'Est, t.42

Linckenheld E., 1927, «Les mardelles de Lorraine», *Bulletin de l'association philomatique d'Alsace et de Lorraine*, t. 7, p.169-177

Llopis E., 1985, *Mathay (Doubs). L'Essarté. Rapport sur la campagne de sauvetage 1985*, Besançon, SRA de Franche-Comté, 60 p.

Llopis E., 1986, *Découverte d'un quartier de potier au lieu dit Essarté à Mathay (25). Campagne de fouilles 1986*, Besançon, SRA de Franche-Comté, 87 p.

Llopis E., 1987, *Découverte d'un îlot d'habitation au lieu-dit Essarté à Mathay (25). Campagne de fouille 1987*, Besançon, SRA de Franche-Comté, 45 p.

Llopis E., 1988a, *Mathay. Essarté. Campagne de fouilles 1988. Sauvetage programmé*, Besançon, SRA de Franche-Comté, 74 p.

Llopis E., 1988b, *Mathay. Essarté. 370 – D1. Sauvetage programmé sur trois ans. Rapport de synthèse 1986 à 1988. Rapport de fouilles,* Besançon, SRA de Franche-Comté, 84 p.

Lohr U., 1998, «Digital Elevation Models by Laser Scanning», *Photogrammetric Record*, t.16, p.105-109

Loke M., & Barker R., 1996, «Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method», *Geophysical Prospecting*, t. 44, p. 131-152

Lucaselli M., 2010, «Etude de la céramique ramassée en prospection sur le site des « Arrues »«, *In* : Barral P. (dir.), Bossuet G., Marc J.-Y., Monnier J., Nouvel P., Thivet M., *Projet Collectif de Recherche « Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, Sciences de la Terre et de l'Environnement », Rapport sur la campagne 2010, bilan du projet triennal 2008-2010, programmation de la campagne 2011*, Besançon, SRA de Franche-Comté, p. 142-144

Luginbühl Y., 2007, «Pour un paysage du paysage», *Économie rurale*, t. 297, p. 23-40

Mc Neill J.-D., 1980a, *electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers, Technical Note TN-6*, Mississauga, Ontario, Canada, Geonics Limited, 20 p.

Mc Neill J.-D., 1980b, *electrical conductivity of soils and rocks, Technical Note TN-5,* Mississauga, Ontario, Canada, *Geonics Limited*, 13 p.

Mangin M., Jacquet B., Jacob J.P., 1986, *Les agglomérations secondaires en Franche-Comté romaine*, Paris, les Belles Lettres, Annales littéraires de l'université de Besançon, 257 p.

Marc J.-Y., Blin S., 2011, «Le grand sanctuaire de Mandeure à l'époque impériale et ses destinataires», *Bulletin de la Société d'Emulation de Montbéliard, 2011*, p. 22-54

Marc J.-Y., Mougin P., 2001, **«**Etudes sur le théâtre Antique», In : Barral P. (dir.), *Projet Collectif de Recherche «Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, territoire et environnement»*, Rapport annuel d'activité 2001, Besançon, SRA de Franche-Comté, p. 19-126

Marc J.Y., Andre N., Barral P., Blin S., Bossuet G., Joly M., Mougin P., Thivet M., 2007, «Le complexe du sanctuaire et du théâtre de Mandeure (Doubs, F), de ses origines gauloises à sa monumentalisation romaine», *In* : Belet-Gonda C., Mazimann J.P., Richard A., Schifferdecker F., (dir.)., *Premières journées archéologiques frontalières de l'Arc jurassien. Actes. Delle (F) – Boncourt (CH), 21-22 octobre 2005. Mandeure, sa campagne et ses relations d'Avenches à Luxeuil et d'Augst à Besançon. Actualités archéologiques régionales.* PUFC : Besançon et Cahier d'archéologie jurassienne, Porrentruy, p. 13-34

Mark R., 2005, **«**Multidirectional, oblique-weighted, shaded-relief image of the Island of Hawaii**»**, U.S. Geological Survey, Open-File Report, p. 92-422

Mazimann J-P., 1992, *Mathay Champ des Isles, Rapport de fouille de sauvetage programmé*, Besançon, SRA de Franche-Comté, 38 p.

Mazimann J.-P., Mougin P., 1995, «Le stockage gallo-romain: les «silos» de Mandeure-Mathay», *In*: Richard A., Munier C. éd., Eclats d'Histoire, 25000 ans d'héritages. 10 ans d'archéologie en Franche-Comté, Besançon, Cêtre éd., p. 152-153

Mazimann J.P., 1999, *Mandeure - Cloux du Château, rapport d'évaluation de la campagne 1998*, Besançon, SRA de Franche Comté, 58 p.

Meyer de Stadelhoffen C., 1991, *Application de la géophysique aux recherches d'eau*, Paris,Lavoisier éd, collection «TEC & DOC», 183 p.

Minetti A., Moia C., Roi G., Susta D., Feretti G., 2002, «Energy cost of walking and running at extreme uphill and downhill slopes», *Journal of Applied Physiology*, t. 93, p. 1039-1046

Millotte J.-P., 1969, «Franche-Comté», *Gallia préhistoire*, t. 12 (2), p. 465-484

Millotte J-P. & Lambert G-N., 1996, «Le Pays de Montbéliard et la Porte de Bourgogne et d'Alsace : voie de passage ou frontière culturelle aux âges des métaux», *Bulletin de la Société d'Émulation de Montbéliard*, n° 119, p. 3-50

Monnier J., Cramatte C., Burgevin A., Fort I., Mouton S., Blin S., Mougin P., 2006, «Recherches sur la fortification et l'occupation du Bas-Empire», *In* Barral P. (dir.), Barral P., Bossuet G., Monnier J., Marc J.Y., Thivet M., Responsables d'opérations, *Rapport annuel d'activité 2006 du PCR., Projet collectif de recherche «Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, territoire et environnement»*, Besançon, SRA de Franche-Comté, p. 125-175

Monnier J., Bolliger S., Burgevin A., Fort I., Mouton S., 2007, «Recherches sur la fortification et l'occupation du Bas-Empire», *In* : Barral P. (dir.), Barral P., Bossuet G., Marc J.Y., Monnier J., Nouvel P., Thivet M., 2007, Responsables d'opérations - *Projet Collectif de Recherche* «*Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, territoire et environnement*». *Rapport annuel d'activité 2007*, Besançon, SRA de Franche-Comté, p.143-188

Morel-Macler F., 1822, «Antiquités – Fouilles de Mandeure», *Annuaires Statistiques et Historique du département du Doubs pour l'année 1822*, Besançon, p. 376-379

Morel-Macler F., 1847, *Antiquités de Mandeure*, Montbéliard, 22 p., 62 pl.

Morel-Macler F., 1860, «Recherches archéologiques», *Compte-rendu de la Société d'Emulation de Montbéliard*, Montbéliard, p. 77-78

Morel-Macler F., 1881, *Supplément aux antiquités de Mandeure*, Manuscrit n° 176 conservé à la bibliothèque municipale de Montbéliard, 109 pl.

Morel J.P., 1976, «Informations archéologiques : circonscription de Franche-Comté (Mandeure)», *Gallia*, CNRS, t. 34, p. 418-420

Mougin P., 1990, «Le site archéologique de Mandeure : fouilles récentes (1988-90)», *Mémoires de la société d'émulation de Montbéliard 1990*, p. 185-227

Mougin P., 1994, «Mandeure-Epomanduodurum (Doubs)», *In* : Petit J.-P., Mangin M. (dir.), *Atlas des agglomérations secondaires de la Gaule Belgique et des Germanies*, Errance, Paris, p. 91-93

Mougin P., 2000, *Mandeure « Cloux du Château », rapport d'évaluation de la campagne 1999*, DFS, Besançon, SRA Franche-Comté

Mougin P. & Watts D., 1996, «Nouvelle approche des Thermes de Courcelles (Mandeure), à partir des découvertes de 1996», *Mémoire de la Société d'Emulation de Montbéliard*, t. 119, p. 147-192

Mougin P., (dir.), Vaxellaire L., Watts D., 1997, *Mathay (Doubs) SHUNT, Franche-Comté, Document final de synthèse, Diagnostic sur le tracé de la déviation nord de Mathay*, SRA Franche-Comté, S.I.V.U Mandeure Mathay, A.F.A.N Grand Est, 89 p.

Mougin P., (dir.), Dard I., Dubois S., Mougin C., 2002, *Mathay (Doubs) SHUNT2, Franche-Comté, Document final de synthèse, Diagnostic sur le tracé de la déviation nord de Mathay*, SRA Franche-Comté, S.I.V.U Mandeure Mathay, INRAP Grand Est

Mougin P., Kunhle G., Schwien J.J., 2003, *Mandeure et Mathay*, Paris : Centre des monuments nationaux / Monum, Éditions du patrimoine, 243 pages (Documents d'évaluation du patrimoine archéologique des villes de France ; 22) [non publié]

Muller C., 1999, *La forêt de Chailluz. 1500-1674.* Mémoire de maîtrise d'Histoire Moderne, Besançon, Université de Franche-Comté, 2 vol.

Noizet H., 2006, «Méthodologie des SIG appliqués à l'histoire urbaine», *Le Médiéviste et l'ordinateur*, t. 44

Noizet H., 2007, *La fabrique de la ville: espaces et sociétés à Tours, IXe-XIIIe siècle,* Publications de la Sorbonne, vol. 92, 504 p.

Nouvel P., 2006, «Prospection diachronique sur le territoire de l'agglomération d'Epomanduodurum et ses marges», *In* : Barral P. (dir.), Barral P., Bossuet G., Marc J.Y., Monnier J., Nouvel P., Thivet M., Responsables d'opérations, *Rapport annuel d'activité 2006 du PCR «Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, Sciences de la Terre et de l'Environnement»,* Besançon, SRA de Franche-Comté, p. 249-267

Nouvel P., 2007, «Prospection diachronique sur le territoire de l'agglomération et ses marges», *In* : Barral P. (dir.), Barral P., Bossuet G., Marc J.Y., Monnier J., Nouvel P., Thivet M., Responsables d'opérations, *Rapport annuel du PCR «Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, territoire et environnement»,* Besançon, SRA de Franche-Comté, p. 252-257

Nouvel P., 2009, «L'espace micro-régional : formes et rythmes de l'occupation rurale», *In* : Barral P. (dir.), Bossuet G., Marc J.-Y., Monnier J., Nouvel P., Thivet M., *Projet Collectif de Recherche « Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, Sciences de la Terre et de l'Environnement ». Rapport intermédiaire sur la campagne 2009,* Besançon, SRA de Franche-Comté, p. 70-98

Nouvel P., 2010, «Dynamique de l'occupation humaine à Mandeure et dans l'espace proche, de la Protohistoire à la fin de l'antiquité (synthèse des données de prospection et de fouilles, état 2010)», *In* : Barral P. (dir.), Bossuet G., Marc J.-Y., Monnier J., Nouvel P., Thivet M., *Projet Collectif de Recherche « Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, Sciences de la Terre et de l'Environnement », Rapport sur la campagne 2010, bilan du projet triennal 2008-2010, programmation de la campagne 2011,* Besançon, SRA de Franche-Comté, p. 23-32

Nouvel P., Thivet M., 2009, «La zone cultuelle et les sanctuaires laténiens et gallo-romain», In : Barral P. (dir.), Bossuet G., Marc J.-Y., Monnier J., Nouvel P., Thivet M., *Projet Collectif de Recherche « Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, Sciences de la Terre et de l'Environnement ». Rapport intermédiaire sur la campagne 2009,* Besançon, SRA de Franche-Comté, p. 101-211

Nuninger L., 2002, *Peuplement et territoires protohistoriques du VIIIe au Ier s. av. J.-C. en Languedoc oriental (Gard-Hérault*), thèse de doctorat, Besançon, Université de Franche-Comté, 2 vol.

Nuninger L., 2010, «Action LIEPPEC Lidar pour l'Etude des Paysages Passés et Contemporains», *In* **:** Favory F., Mouret I. (dir.), *Bilan quadriennal 2008-2011 de la MSHE C.N. Ledoux*, inédit

Opitz R, 2008, *LiDAR Survey for Archaeology*, PHD Thesis, Cambridge, 569 p.

Pallier C., 2001, *Etude géoarchéologique en milieu alluvial sur le site gallo-romain d'Epomanduodurum (Mathay-Mandeure, Doubs)*, Rapport de stage de DESS «Méthodes scientifiques et techniques en Archéologie», Dijon, Université de Bourgogne, 48 p.

Panissot C., 1997, *Prospection électrique et électrostatique à faible profondeur à l'aide de systèmes multipoles permettant la description directe des structures en 3D*. Thèse de Doctorat, Paris, Université Pierre et Marie Curie Paris VI, 295 p.

Panissod C., Dabas M., Hesse A., Jolivet A., Tabbagh A., Tabbagh J., 1998, «Recent developments in shallow-depth electrical and electrostatic prospecting using mobile arrays», Geophysics, t. 63 (5)

Parent E., 1953, *Topographie de la paroisse de Bourguignon*, 21 p.

Parrot J.L., 1835, Mémoires sur les antiquités de Mandeure (copié réalisé en 1835), in *Manuscrit conservé à la Bibliothèque de Besançon, Collection Duvernoy n° 59*, 1835, fol.119-157

Passard F., 1980, «L'habitat au Néolithique et au début de l'Age du Bronze en Franche-Comté», *Gallia-Préhistoire*, t. 23(1), p. 38-114

Passard F., 1986, «Plan des villages et architecture des maisons. Essai d'interprétation», *In* : P. Pétrequin (éd.), *Les sites littoraux néolithiques de Clairvaux-les-lacs (Jura). I : Problématique générale. L›exemple de la station III*, Editions de la Maison des Sciences de l'Homme, Paris, p. 263-288

Passard F., Urlacher J.-P., 1987, *Mathay, Station de pompage : sondage et Travaux de surveillance*, Besançon, SRA Franche-Comté, 4 p.

Passard F., Piningre J.-F., Urlacher J.-P., 1990, «L'habitat et l'occupation du sol des plateaux du Jura central et du bassin supérieur de la Saône», *Colloque international de Lons-le-Saunier, 16-19 mai 1990*, p. 195-226

Paquier M., 1986, *La vallée du Doubs et son environnement archéologique de Besançon à Mandeure (exclus) à l'époque romaine*, Mémoire de Maîtrise, Besançon, Université de Franche-Comté

Perpillou A., 1979, *Carte de l'utilisation du sol en France*, XIXe siècle, Paris, CNRS

Peterken G. & Game M., 1984, **«**Historical factors affecting the number and distribution of vascular plants species in Central Lincolnshire», *Journal of Ecology*, t. 72, p. 155-182

Petit B., 1986, *Mathay (Doubs). L'Essarté. Site archéologique n°2537011. Maison Curti 85. Rapport sur la campagne de sauvetage 1986*, Besançon, SRA de Franche-Comté,13 p.

Petit J.-P., Mangin M., 1994, *Les agglomérations secondaires. La Gaule Belgique, les Germanies et l'Occident romain*, Actes du colloque de Bliesbruck-Reinheim (Moselle), 21, 22, 23 et 24 octobre 1992, Paris, Errance, 293 p.

Pfeifer N. & Briese C., 2007, «Geometrical aspects of airborne laser scanning and terrestrial laser scanning», *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, t. 36 (3), p.311-319

Pichot V., 1996, *Le sanctuaire celtique d'Epomanduodurum et ses antécédents celtiques*, Mémoire de DEA, Besançon, Besançon, Université de Franche-Comté, 85 p.

Pline l'Ancien, *L'Histoire naturelle*, éditions des Belles Lettres, Paris, 1962, 198 p.

Polfer M., 2005, L'artisanat dans l'économie de la Gaule Belgique romaine à partir de la documentation archéologique, M. Mergoil Éd., *Monographies Instrumentum*, 28, 182 p.

Raber G., Jensen J., Hodgson M., Tullis J., Davis B., Berglend J., 2007, «Impact of LiDAR nominal post-spacing on DEM accuracy and flood zone delineation», *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, t. 73, p.793-804

Ramirez J., 2006, «A new approach to relief representation», S*urveying and Land Information Science*, t. 66, p.19-25

Reddé M., Brulet R., Fellmann R., Haalebos J.K., von Schnurbein S. (dir.), 2006, L*es fortifications militaires. L'architecture de la Gaule romaine*, Bordeaux, MSH-Ausonius, Documents d'archéologie française, 100, 477 p.

Reutebuch S., Andersen H.E., McGaughey R.J., 2005, «Light detection and ranging (LIDAR) an emerging tool for multiple resource inventory», *Journal of Forestry*, t. 103, p.286-292

Reynolds J., 1997, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, Chichester, John Wiley & Sons ed., 806 p.

Rivet L., 1990, «Les ateliers de production céramique dans l'est de la Gaule ; Méthodologie : comptage et quantification en céramologie ; Actualité des recherches céramiques en Gaule / Société française d'étude de la céramique antique en Gaule», *Actes du congrès de Mandeure-Mathay, 24-27 mai 1990* : textes rassemblés et présentés par Lucien Rivet, 6e éd**,** SFECAG, Marseille, 238 p.

Robert S., 2003, *L'analyse morphologique des paysages : entre archéologie, urbanisme et aménagement du territoire*, Thèse de doctorat, Paris, Université de Paris I Panthéon Sorbonne, 2 vol.

Scollar I., 1962, **«**Electromagnetic prospecting method in archaeology**»**, *Archaeometry*, t. 5 (1), p. 146-153

Scollar I., Tabbagh A., Hesse A., Herzog I., 1990, *Archaeological prospecting and remote sensing*, Cambridge University Press, 674 p.

Sensors & Software, 2002, *EKKO_Mapper User's Guide Version 2.0,* Mississauga, 48 p.

Silván-Cárdenas, J. L. & Wang L., 2006, «A multi-resolution approach for filtering LiDAR altimetry data», *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, t. 61, p.11-22

Sithole G., 2001, «Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter», *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial, Information Sciences*, t. 34, p. 203-210

Sithole G. & Vosselman G., 2004, «Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds», *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, t. 59, p.85-101

Sittler B., 2004, «Revealing Historical Landscapes by Using Airborne Laser-Scanning - A 3D-Modell of Ridge and Furrow in Forests near Rastatt (Germany)», International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, t. 36, p. 258-261.

Stocco S, Godio A,Sambuelli L., 2009, «Modeling and compact inversion of magnetic data: A Matlab code», *Computer & Geosciences*, t. 35, p. 2111-2118

Stoker J. M., Greenlee S. K., Gesch, D.B., Menig, J., 2006, «CLICK: the new USGS center for LiDAR information coordination and knowledge» *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, t. 72 (6), p. 613-616

Suméra F., Veyrat E., 1997, «Les fours à chaux gallo-romains de « Brétinoust », commune de Sivry-Courtry (Seine-et-Marne)», *Revue archéologique du Centre de la France*, t. 36, p. 99-130

Tabbagh J., 2000, «Filtrage numérique des données géophysiques», *In* : Pesoquinucci M., Trément F. Éd., Non-destructive Techniques Applied to landscape Archeology, p. 173-181

Tchirakadzé C., 1983, «Découverte d'une sépulture du haut Moyen-Age au théâtre romain de Mandeure (Doubs)», *Revue Archéologique de l'Est*, t. 34, fasc. semestriel n° 133-134

Telford W., Geldart L., Sheriff R., 1990, *Applied geophysics*, Cambridge, Cambridge University Press, 221 p.

Thellier E., 1938, *Sur l'aimantation des terres cuites et ses applications géophysiques*, Paris, These de Doctorat, 145 p.

Thivet M., 2005, «Transect géo-archéologique et sondage archéologique, Rapport de sondage programmé», *In* : Barral P. (dir.), Barral P., Bossuet G., Chevrier S., Kuhnle G., Marc J.Y., Thivet M., Responsables d'opérations, *Projet Collectif de Recherche «Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, territoire et environnement». Rapport annuel d'activité 2005*, Besançon, SRA de Franche-Comté, p. 79-112

Thivet M., 2006, «Transect géo-archéologique et sondage archéologique, Rapport de sondage programmé», *In :* Barral P. (dir.), Barral P., Bossuet G., Marc J.Y., Monnier J., Thivet M., Responsables d'opérations - *Projet Collectif de Recherche «Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Archéologie, territoire et environnement». Rapport annuel d'activité 2006*. Besançon, SRA de Franche-Comté, p. 69-84

Thivet M., 2008, *Méthodes nouvelles de l'archéologie appliquées au site antique de Mandeure-Mathay, (Doubs).Reconnaissance spatiale, évolution chronologique, statut urbain*, Thèse de Doctorat, Besançon, Université de Franche-Comté, 2 vol.

Thivet M., Nouvel P., 2009, «L'occupation laténienne du sanctuaire des *Champs des Fougères* à Mandeure (Doubs), Campagnes 2007 et 2008», *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude de l'Age du Fer*, t. 27, p. 59-63

Thivet M., Bossuet G., Mougin P., 2009, «Mise en évidence de l'impact de l'occupation antique dans la morphogenèse d'un paysage de fond de vallée : le cas du site d'Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs)», *Revue Archéologique de l'Est*, t. 58, p. 417-437

Thoen D. & Hérault B., 2006, «Flore, groupes socio-écologiques et typologie des mardelles forestières de Lorraine belge et luxembourgeoise», *Bulletin de la Société des naturalistes luxembourgeois*, t. 107, p. 3-25

Thuillier P., 2004, «la prospection en milieu boisé», *In* : Racinet P., & Joël Schwerdorffer J. (dir.), *Méthodes et initiations d'histoire et d'archéologie*, éditions du temps, p. 26-37

Tite M. & Mullins C., 1970, «Electromagnetic prospecting on archaeological sites using soil conductivity meter», *Archaeometry*, t. 12, p. 97-104

Trillaud S., 2005, *Apports des méthodes géophysiques à la compréhension des environnements en archéologie. Sites gaulois et gallo-romain de Mathay-Mandeure (Doubs).* Mémoire de Master 2 « Géophysique Appliquée, Ressources, Environnement », Paris, Université Pierre et Marie Curie Paris VI, 47 p.

Trunk M., 1994, *Römische Tempel in der Rhein- und westlichen Donauprovinzen*, Augst, éd. Römerstadt Augusta Raurica (coll. Forschungen in Augst, 14)

Ulrich R., 2007, *Roman woodworking*, Londres, Yales University Press, 376 p**.**

Urlacher J.P., Avanzi V., Depierre G., 1983, *Le site archéologique «Les Avets» à Mathay (Doubs): Fouille de sauvetage 1982-1983*, Besançon, SRA de Franche-Comté

Urlacher J.-P., 1989, «Camps et habitats de hauteur : Plateau du Jura externe au sud-est de Besançon, les avants monts et collines préjurassiennes entre vallées du Doubs et de l'Ognon et Montbéliard», *Gallia Information*, 1987-1988, t. 2, p. 129-131

Vanwalleghem T., Poesen J., Vitse I., Bork H.R., Dotterweich M., Schmidtchen G., Deckers J., Lang A. , Mautz B., 2006, «Origin and evolution of closed depressions in central Belgium, European loess belt», *Earth Surface Processes and Landforms*, t. 32, p.574-586

Vaxelaire L., 1989, *Essarté*, Besançon, SRA de Franche-Comté, 35 p.

Vosselman G., 2000, «Slope based filtering of laser altimetry data. *International Archives of Photogrammetry», Remote Sensing and Spatial Information Sciences,* t. 33, p. 935-934

Wack R. & Wimmer A., 2002, «Digital terrain models from airborne laser scanner data - a grid based approach», *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, t. 34, p. 293-296

Wagner W., Ullrich A., Ducic V., Melzer T., Studnicka, N., 2006, «Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitizing airborne laser scanner», *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, t. 60, p. 100-112

Watteaux M., 2009, *La dynamique de la planimétrie parcellaire et des réseaux routiers en Vendée méridionale*, Paris, Thèse de Doctorat, Université de Paris I Panthéon-Sorbonne, 3 vol.

Weiss A., 2001, *Topographic Position and Landforms Analysis*, Poster presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA

Wehr A., Lohr U., 1999, «Airborne laser scanning - an introduction and overview», *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, t. 54, p. 68-82

Wichmann D., 1903, «Über die Maren oder Mertel in Lothringen (mit einem Bericht über die Ausgrabungen des Herrn Colbus in Altrip)», *Jahrbuch des Gesellchaft für Lothringische Geschichte une Altertumskunde*, t. 15, p. 218-262

Ziadat, F., 2007, «Effect of Contour Intervals and Grid Cell Size on the Accuracy of DEMs and Slop Derivatives», *Transactions in GIS,* t. 11 (1), p 67-81

Annexe

Annexe A: fiche type de prospection

COMMUNE	ROCHE-LES-BLAMONT	DEPARTEMENT	DOUBS
: LIEU-DIT IGN	BOIS DES COTAYS	Référence LIDAR:	FORET DE CHATEL
Nature du site ou de la trouvaille Nature du terrain -Chronologie			CARTES :
.Découverte d'un lingot bipyramidal en fer de l'Age du fer dans le bas d'une crête en pente. Sur le point haut, un rempart révélé par le LIDAR est visible, mais aucun élément de datation n'y a été découvert. Le lingot se trouvait à une dizaine de centimètres de profondeur, pris dans des racines (voir clichés)			PhotoExploreur 3D CD 25 NORD – Doubs Nord Dalle BLAMONT Carte IGN 1:25000 – 3622OT-2000
SITE INEDIT: [redacted] TROUVAILLE ISOLEE : [redacted] SITE REPERTORIE : O LOCALISATION D'UN SITE REPERTORIE : O INDICE DE SITE : O			

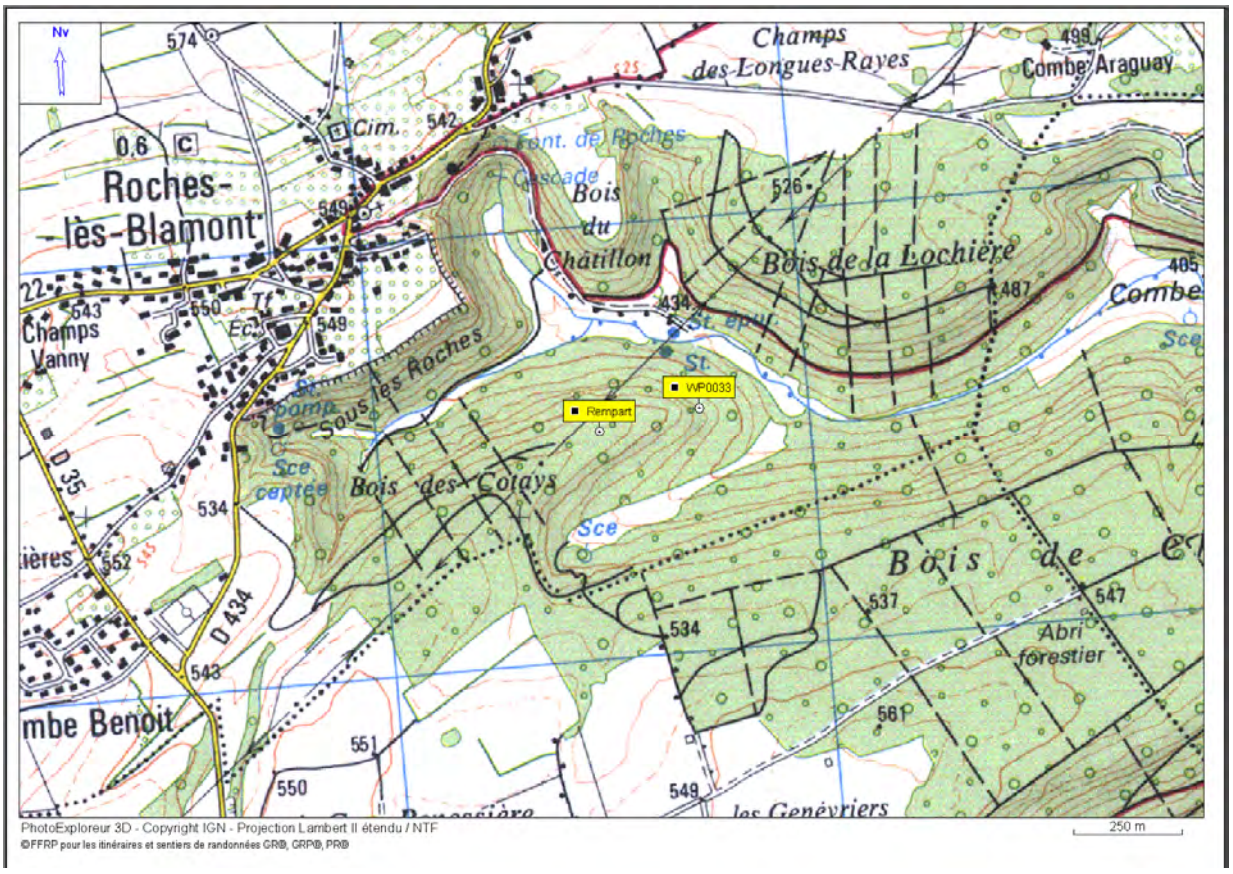
DESCRIPTION DU SITE OU DE LA TROUVAILLE



Fiche :	Prospecteurs :	Découvreur du lingot :	Prospections :
Grut Hervé	**Grut Hervé, Laplaige Clément, Marmier Thérèse**	**Grut Hervé**	**LIDAR 21/04/2011**

ROCHE-LES-BLAMONT, Forêt De Chatel

CARTE *IGN* ET
WAYPOINT *GPS Triton Magellan*



WAYPOINT				
IDENT	**COMMENT**	**ALT**	**X**	**Y**
Rempart	Petit rempart, site de type éperon barré	513	941,183833333334	2277,19866666667
WP0033	Lingot en fer bipyramidal	490	941,413611740975	2277,25365832265

ROCHE-LES-BLAMONTS « Lingot bipyramidal » **Cliché Grut Hervé**



Cliché 1. Situation de l'emplacement du Lingot



Cliché 2 à 4. Progression du dégagement du lingot

ROCHE-LES-BLAMONTS « Lingot bipyramidal » **Cliché Grut Hervé**

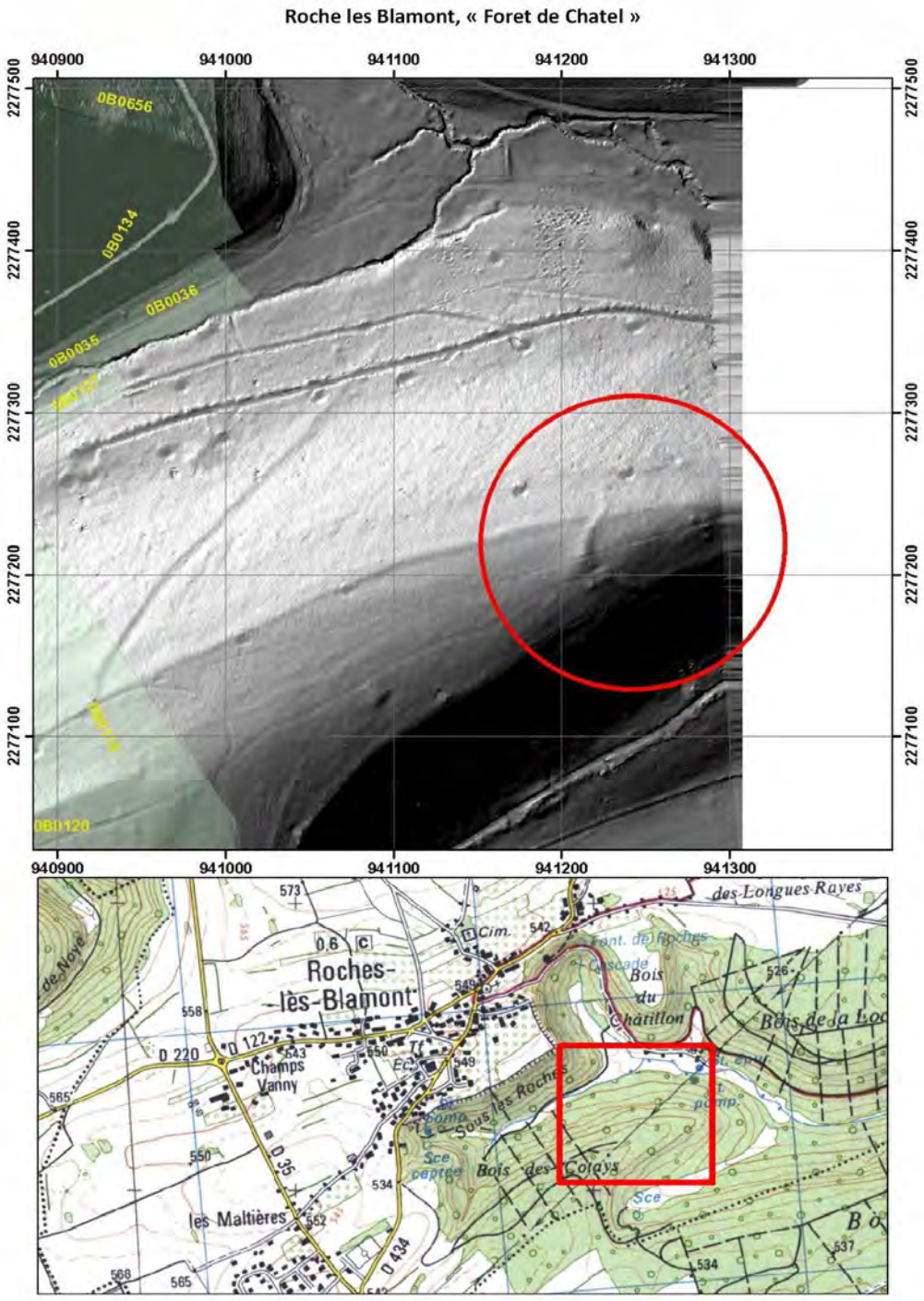


Cliché 3

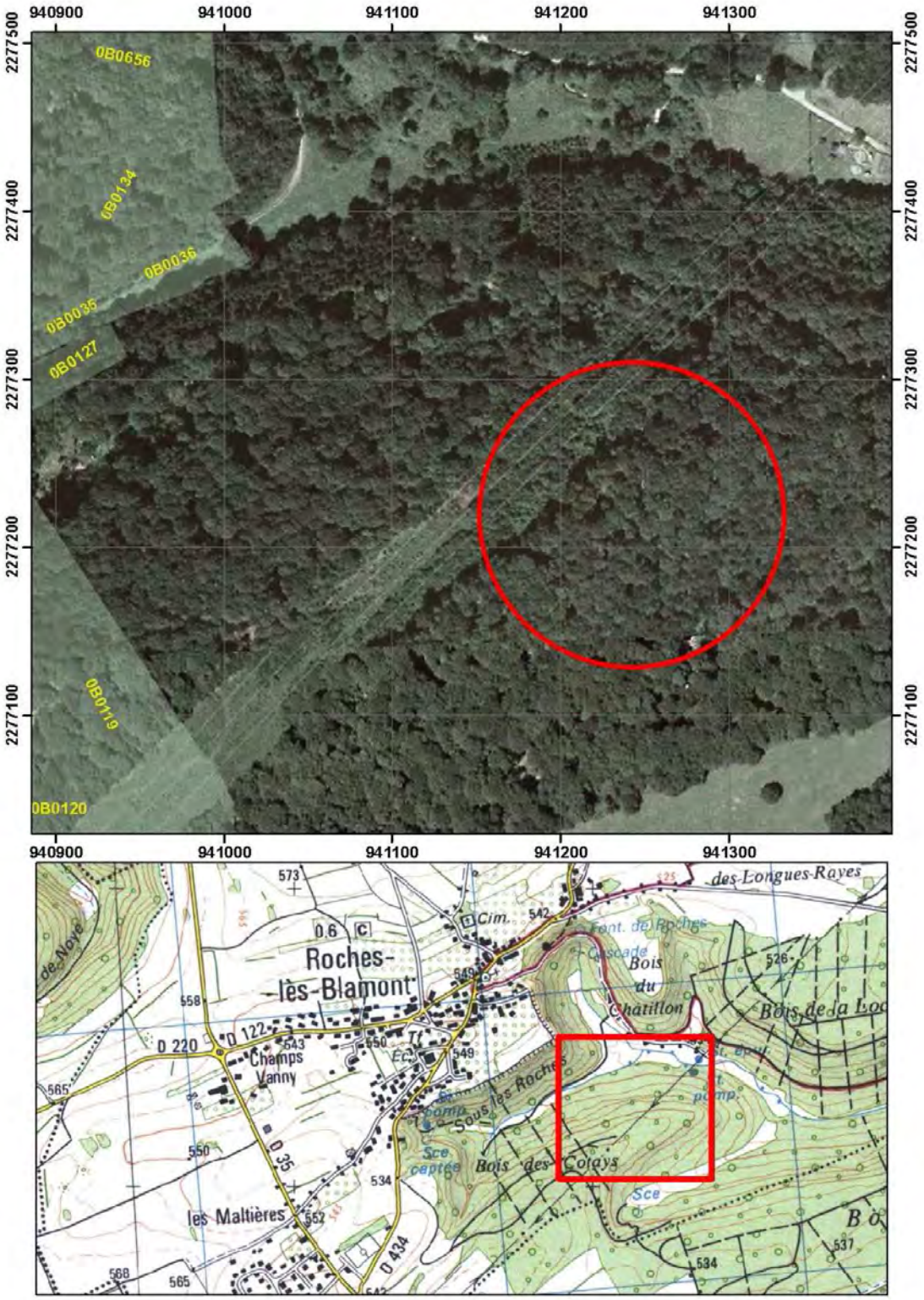


Cliché 4

CLICHE LIDAR
Communiqué par Clément Laplaige



Site totalement inédit, on peut observer un petit éperon barré (cercle rouge), il est situé juste en vis-à-vis du site de chatillon ou du matériel néolithique, Bronze et laténien a été découvert.



Annexe B: rapport de prospection LiDAR de la société Aerodata

MSHE CLAUDE NICOLAS LEDOUX
USR 3124 CNRS
(UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ)

ACQUISITION ET PRÉTRAITEMENT DE DONNÉES ALTIMÉTRIQUES PAR LASER AÉROPORTÉ SUR LES SECTEURS DE BESANÇON ET MANDEURE-MATHAY



SOCIETE AERODATA FRANCE

RAPPORT DE SYNTHESE

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UFC UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

Lille, le 06 Novembre 2009

Réf. QN08-0321

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE 1 : GENERALITES
A.1. Avant-Propos 7
A.2. Territoires couverts 7
A.3. Système de projection 8

CHAPITRE 2 : ACQUISITION DES DONNEES LASER
B.1. Paramètres de vol 10
B.2. Plans et rapports de vol 11

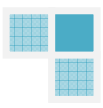
CHAPITRE 3 : ACQUISITION DES DONNEES IMAGES
C.1. Paramètres de vol 21
C.2. Plans de vol 21
C.3. Rapport de vol 25

CHAPITRE 4 : CANEVAS PHOTOGRAMMETRIQUE
D.1. Au sol 27
D.2. Pendant le vol 29
D.3. Au bureau 30
D.3.1. Pour l'acquisition laser : Calcul de la trajectographie 30
D.3.2. Pour la prise de vues numériques : Stéréopréparation et Aérotriangulation 30

CHAPITRE 5 : DONNEES LASER BRUTES ET GENERATION DU MNT
E.1. Livraison des données laser brutes 36
E.2. Un MNT issu des données laser 37
E.2.1. Liste des objets intégrés dans le MNT 38
E.2.2. Format de livraison 38

CHAPITRE 6 : CONFECTION DE L'ORTHOPHOTOGRAPHIE
F.1. Généralités 41
F.2. Redressement différentiel 41
F.3. Qualité de l'image 41
F.4. Mosaïquage et dallage 42

CHAPITRE 7 : DROITS D'USAGE / CONTACT
G.1. Droits d'utilisation 45
G.2. Contact 45

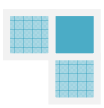


Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

3

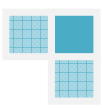
Acronymes / Abréviations / Définitions

AEROTRIANGULAION	Méthode de constitution d'un canevas d'appui, en utilisant les relations géométriques qui lient les photographies adjacentes d'une prise de vues stéréoscopiques, et un nombre restreint de points d'appui. On peut également prendre en compte des mesures complémentaires, telles que la trajectographie GPS ou la mesure inertielle d'attitude.
ANGLE DE FAUCHEE	La qualité du levé dépend de l'angle utilisé par le scanner : plus l'angle est important, plus le territoire couvert sera vaste, mais des artéfacts en bordure rendront les données plus incertaines (phénomène d'ombrage, tache du signal au sol plus grande).
DGPS	*Differential Global Positioning System* (Système de référencement différentiel).
EMQ	Erreur Moyenne Quadratique : 2,6 fois inférieure à la tolérance.
EXACTITUDE METRIQUE	Grandeur caractérisant la justesse de la détermination de la position planimétrique et/ou altimétrique de points très bien définis, par un système de lever sur le terrain ou de calcul, ou de représentation cartographique, par rapport à leur position nominale ou vraie correspondante. L'exactitude métrique est généralement estimée par l'évaluation de l'erreur moyenne quadratique, planimétrique et/ou altimétrique sur des points de vérification, en comparant leurs coordonnées calculées à celles de référence.
GPS	*Global Positioning System*.
LiDAR	*Light Detection And Ranging*
MOSAIQUE D'IMAGES	Document résultant d'un montage d'images de scènes, ou de parties de scènes, prétraitées pour être raccordables géométriquement et radiométriquement.
ORIENTATION	L'orientation des modèles peut se réaliser en 2 ou 3 étapes : - Orientation interne : établit une projection conique aussi parfaite que possible de l'espace objet dans le plan du cliché ; - Orientation relative : établit les coordonnées d'un point P quelconque dans l'image, non pas dans le référentiel de l'objet mais dans un référentiel lié à l'une des deux caméras (élimination de la parallaxe) ; - Orientation absolue : établit un lien précis entre les coordonnées image et les coordonnées terrain. Cette orientation nécessite d'avoir effectué préalablement l'orientation relative - Orientation extérieure : établit une relation directe entre les coordonnées image et les coordonnées terrain via les 6 paramètres d'orientation de chaque prise de vues : X, Y, Z (latitude, longitude et altitude), Omega, Phi et Kappa (tangage, roulis et lacet). Cette opération permet de s'affranchir des 2 étapes précédentes.



Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

ORTHOPHOTOGRAPHIE	Image photographique sur laquelle ont été corrigées les déformations géométriques dues au relief du terrain, à l'inclinaison de l'axe de prise de vues et à la distorsion de l'objectif. Une orthophotographie est pratiquement toujours obtenue à partir d'un cliché métrique. Elle peut présenter des déformations résiduelles et des manques de couverture d'autant moins négligeables que les pentes de terrain sont fortes et les superstructures plus nombreuses et plus élevées. Les déformations dues aux superstructures anthropiques peuvent être corrigées, notamment à partir d'un modèle numérique altimétrique des surfaces urbanisées. Une orthophotographie a la précision d'une carte et recèle une information plus riche, mais non interprétée.
ORTHOIMAGE	Synonyme d'orthophotographie.
ORTHOPHOTOPLAN	Assemblage ou mosaïque d'orthophotographies par opposition au photoplan (assemblage de photographies aériennes redressées à une échelle moyenne commune sur canevas de points connus par leurs positions planimétriques et leurs dénivelés).
ORTHORECTIFICATION	Application à une image de traitements destinés à corriger les déformations dues au relief du terrain (MNT), à l'inclinaison de l'axe de prise de vues et à la distorsion de l'objectif.
OUVRAGES D'ART	Digues, quais, ponts, remblais, murets, enceintes, etc.
STEREOPREPARATION	Localisation sur les clichés de points de coordonnées connues (suppose l'existence de réseaux géodésique et altimétrique matérialisés au sol).
POINT LEVE	C'est un point géoréférencé mesuré directement sans interpolation. Toute réflexion parasite, aberration, etc. n'est pas considérée comme un point correct.
SEMIS DE POINTS BRUTS	Le semis de points "BRUT" est issu directement de l'acquisition des données, hors les données acquises lors de manœuvres brusques de l'avion (virages, fin de course d'une bande de levé,…). Dans le cas d'un système d'acquisition qui délivre plus d'une donnée altimétrique (pénétration variable du couvert végétal par exemple), le semis de point brut indiquera autant de valeurs pertinentes (minimum, maximum...) de z par jeux de coordonnées x,y que nécessaires pour l'obtention des semis de points filtrés décrits ci-dessous. Il sera accompagné d'une carte présentant la densité des points acquis ou de fichiers permettant la réalisation de cette carte avec le logiciel Esri ArcView©.
SEMIS DE POINTS "MNE"	Le semis de points "MNE" comprend tous les éléments du terrain (terrain naturel, bâti, sommet de végétation, routes, ouvrages divers…) hors les artefacts créés par la présence d'objets isolés (voitures, piétons, panneaux…) et les surfaces en eau. Les filtrages pour la création du MNE seront effectués à partir du semis de points « BRUT ».



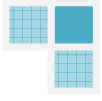
Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

SEMIS DE POINTS "MNT"	Le semis de points « MNT » comprend uniquement les éléments modelant le terrain naturel (terrain naturel « nu », terrain naturel sous végétation, ouvrages modelant le terrain naturel…) hors le bâti et les artefacts liés à la végétation (arbres isolés…). Dans la sous-enveloppe dédiée à l'application « amélioration de la connaissance des zones intertidales », la végétation basse et dense est considérée comme un artefact. Les filtrages pour la création du MNT seront effectués à partir du semis « BRUT ».
TOLERANCE	Erreur qui ne doit pas être dépassée pour 99% des mesures.
TRAITEMENT DU SIGNAL	Dans le cas d'une acquisition laser multi-écho, ce traitement peut consister essentiellement en l'extraction des points dont la différence altimétrique entre le premier et le dernier écho dépasse 1 m.

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

CHAPITRE 1

GENERALITES



Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

A.1. Avant-Propos

Le présent rapport présente l'acquisition et les traitements effectués sur les données Lidar et images acquises dans le cadre du projet « Acquisition et prétraitement de données altimétriques par laser aéroporté sur les secteurs de Besançon et Mandeure-Mathay ».

- Première partie : Préambule
- Seconde partie : Mission LiDAR (Système laser Riegl LMS-Q560)
- Troisième partie : Mission Images RGB+IR (Caméra numérique UltraCam-Xp)
- Quatrième partie : Trajectographie – Travaux terrain
- Cinquième partie : Filtrage des données LiDAR et Génération du MNT
- Sixième partie : Confection de l'orthophotoplan
- Septième partie : Droits d'usage, Contact

A.2. Territoires couverts



En bleu sur la figure ci-dessus est illustrée la limite du territoire couvert (environ 82 km²) sur le secteur de Mandeure-Mathay

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés



En vert sur la figure ci-contre est illustrée la limite du territoire couvert (140 km²)
sur le secteur de Besançon

A.3. Système de projection

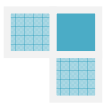
Tous les produits livrés ont été générés dans le système de projection Lambert II Etendu (Méridien de Paris et non Greenwich).

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

CHAPITRE 2

ACQUISITION DES DONNEES LASER

- TECHNOLOGIE LIDAR -



Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

B.1. Paramètres de vol

Cinq missions (deux le matin, une l'après-midi et deux le soir) ont été exécutées sur 3 jours : le 08 (3h00 de vol), le 09 (6h30 de vol) et le 10 avril 2009 (1h15 de vol).

L'acquisition des données LiDAR a été réalisée avec le scanner LMS-Q560, développé par la société allemande RIEGL. Par rapport à la première mission (exécutée le 11 et 12 mars), et aux spécifications techniques que nous vous avions énoncées dans notre mémoire technique, nous avons dû modifier légèrement certains paramètres en raison de contraintes de vol le jour de la campagne.



Toutefois, nous conservons la densité de points requise pour l'élaboration d'un MNT au pas de 50cm, soit :

Paramètres	Valeurs
Fréquence d'impulsion (kHz)	150
Vitesse de vol (noeuds)	90
Angle de scannage (°)	60
Hauteur de vol/sol (m)	entre 500 et 750 / sol
Distance interbande (m)	242
Recouvrement latéral (%)	**70 (3 recouvrements)**
Nombre d'échos enregistrés par impulsion émise	4
Empreinte au sol (diamètre m)	0.35
Densité (pt/m2)	**Entre 8.1 et 11.1 pts/m²**

Avant le début de la campagne aérienne, nous avons dû étalonner notre système laser afin notamment, d'ajuster correctement les bandes de vol entre elles. Pour ce faire, nous avons choisi le secteur du centre-ville de Besançon, que nous avons survolé le 08 avril au soir.



Fréquence d'impulsion (kHz)	240
Vitesse de vol (noeuds)	95
Angle de scannage (°)	60
Hauteur de vol/sol (m)	400
Largeur de bande de vol (m)	460
Empreinte au sol (diamètre m)	0.20
Densité (pt/m2)	**> 10,6 pts/m²**

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

11

B.2. Plans et rapports de vol

Mission du 08 avril 2009 (soir) : Secteur de Besançon



En rouge : les bandes de vol réellement acquises (22 axes, dont 2 relatives au site de calibration)
En jaune : le secteur d'étude
En vert : les virages de l'avion (données laser non enregistrées)

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

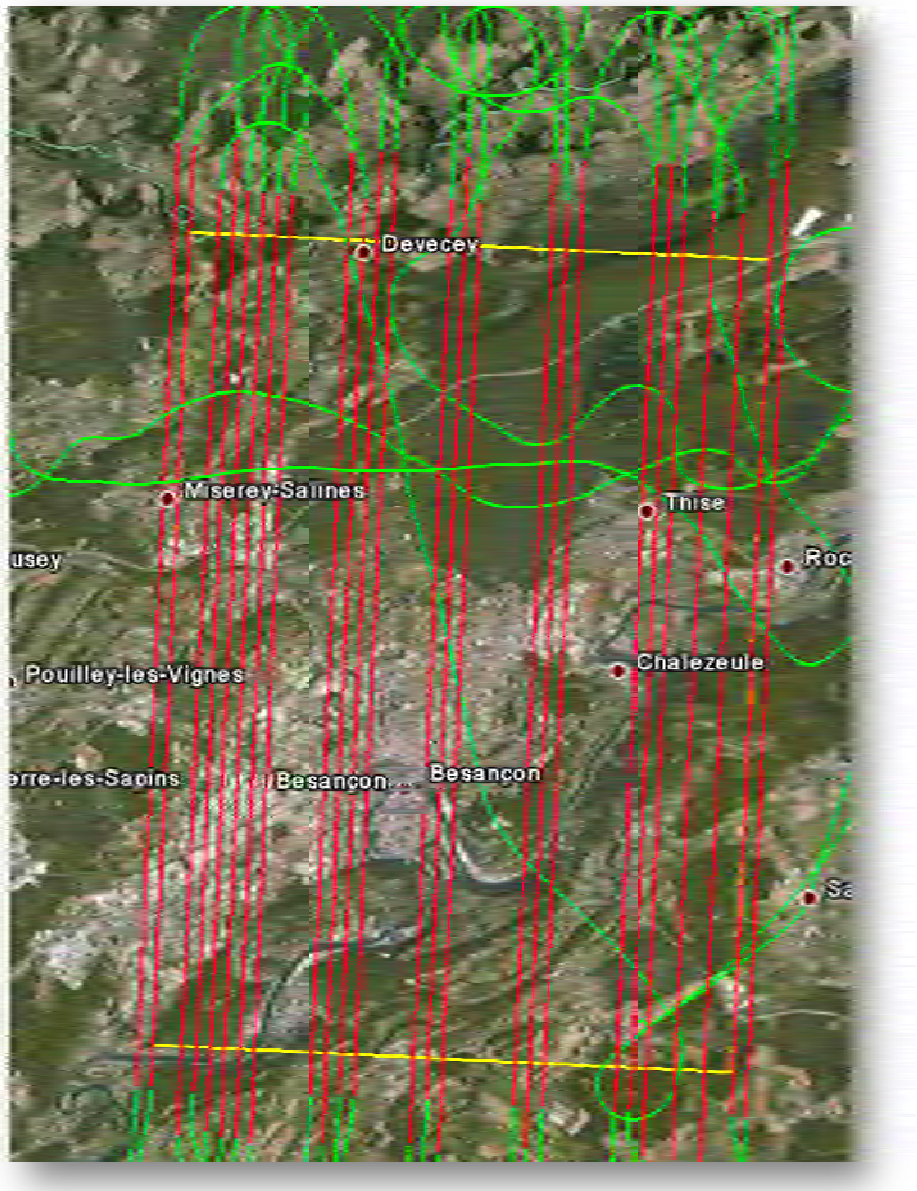
	AERODATA - FLIGHT REPORT - N°:		285	**DATE:**	08/04/2009		
	AIRCRAFT	C206 F-GDAP	TAF METEO :		Sct 5000 Feet		
	PILOT	GERBAULT					
	OPERATEUR	COGNACQ					
	SENSOR	LM5600	vent théorique altitude	230° 10Kt	dérive théorique		
	MONTURE		CAPACITE DE STOCKAGE Début de mission		CAPACITE DE STOCKAGE Fin de mission		
	CCNS N°	3					
	AEC N°/IMU N°	2/256Hz	Disk/Roll/HD	Nb	Disk/Roll/HD	Nb	
	Ashtec N°	/	B	12%	B	44%	
			D	0%	D	0%	
	NOM PROJET	projet WinMP AREA	Photo GSD / ECHELLE	Lidar Pulse/Mode/Angle	VITESSE Kt	Altitude en pied / sol	QNH
	BESANCON	LID-4		150/5/60	90	1650-2460	1016
	AD DEPART	Start Engine	Start recording		Stop Recording	Stop Engines	AD ARRIVE
	LFQM	15:25	15:30		19:15	19:15	LFQM

AXE	stokage HD/MAG	Angle solaire	F/T	Heure debut	1er cliché	dernier cliché	Remarques
+47	B			15:42:00			Calib
-46	B			15:52:00			Calib
-1	B			15:02:00			
+13	B			16:11:00			
-20	B			16:20:00			
+27	B			16:29:00			
-34	B			16:37:00			
+42	B			16:45:00			
-33	B			16:54:00			
+26	B			17:02:00			
-19	B			17:11:00			
+12	B			17:21:00			
-4	B			17:30:00			
+11	B			17:38:00			
-18	B			17:47:00			
+25	B			17:57:00			
-32	B			18:05:00			
+40	B			18:13:00			
-45	B			18:23:00			
+38	B			18:31:00			
-31	B			18:40:00			
+24	B			18:50:00			

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

13

Mission du 09 avril 2009 (matin) : Secteur de Besançon



En rouge : les bandes de vol réellement acquises (25 axes)
En jaune : le secteur d'étude
En vert : les virages de l'avion (données laser non enregistrées)

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

14

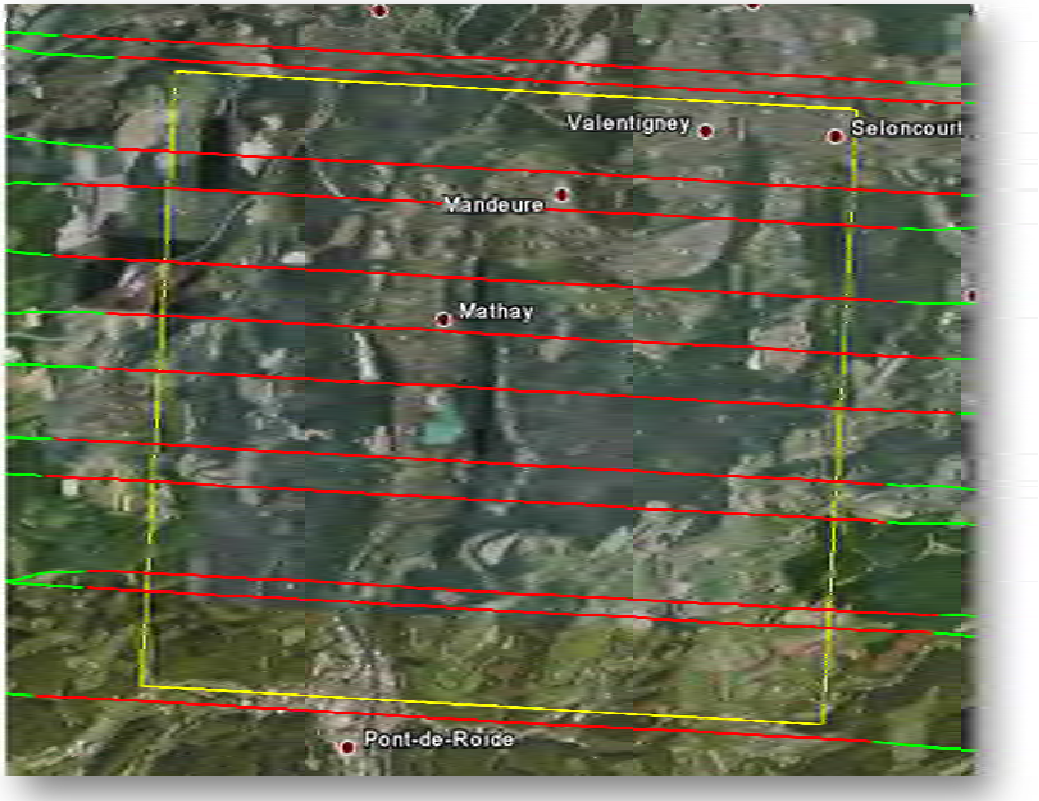
	AERODATA - FLIGHT REPORT - N°:			285	**DATE:**	09/04/2009	
	AIRCRAFT	C206 F-GDAP		TAF METEO :		Cavok	
	PILOT	COGNACQ					
	OPERATEUR	GERBAULT					
	SENSOR	LM5600		vent théorique altitude		dérive théorique	
	MONTURE			CAPACITE DE STOCKAGE Début de mission		CAPACITE DE STOCKAGE Fin de mission	
	CCNS N°	3					
	AEC N°/IMU N°	2/256Hz		Disk/Roll/HD	Nb	Disk/Roll/HD	Nb
	Ashtec N°	/		D	22%	D	37%
	NOM PROJET	projet WinMP AREA	Photo	Lidar	VITESSE Kt	Altitude en pied / sol	QNH
			GSD / ECHELLE	Pulse/Mode/Angle			
	BESANCON	MANDEURE/LID-1		150/5/60°	90	1650-2460	1017
	AD DEPART	Start Engine	Start recording		Stop Recording	Stop Engines	AD ARRIVE
	LFQM	8:20	08:25		14:55	14:55	LFSM

AXE	stokage HD/MAG	Angle solaire	F/T	Heure debut	1er cliché	dernier cliché	Remarques
44	B			08:50:00			BESANCON
-37	B			08:59:00			BESANCON
30	B			09:07:00			BESANCON
-23	B			09:16:00			BESANCON
16	B			09:24:00			BESANCON
-9	B			09:32:00			BESANCON
2	B			09:40:00			BESANCON
-8	B			09:49:00			BESANCON
14	B			09:57:00			BESANCON
-21	B			10:04:00			BESANCON
28	B			10:13:00			BESANCON
35	D			11:10:00			BESANCON
-41	D			11:19:00			BESANCON
43	D			11:27:00			BESANCON
-39	D			11:36:00			BESANCON
36	D			11:44:00			BESANCON
-29	D			11:53:00			BESANCON
22	D			12:05:00			BESANCON
-15	D			12:13:00			BESANCON
17	D			12:22:00			BESANCON
-10	D			12:31:00			BESANCON
3	D			12:38:00			BESANCON
-7	D			12:47:00			BESANCON
6	D			12:56:00			BESANCON
-5	D			13:04:00			BESANCON

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

15

Mission du 09 avril 2009 (après-midi) : Secteur de Mandeure-Mathay



En rouge : les bandes de vol réellement acquises (12 axes)

En jaune : le secteur d'étude

En vert : les virages de l'avion (données laser non enregistrées)

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

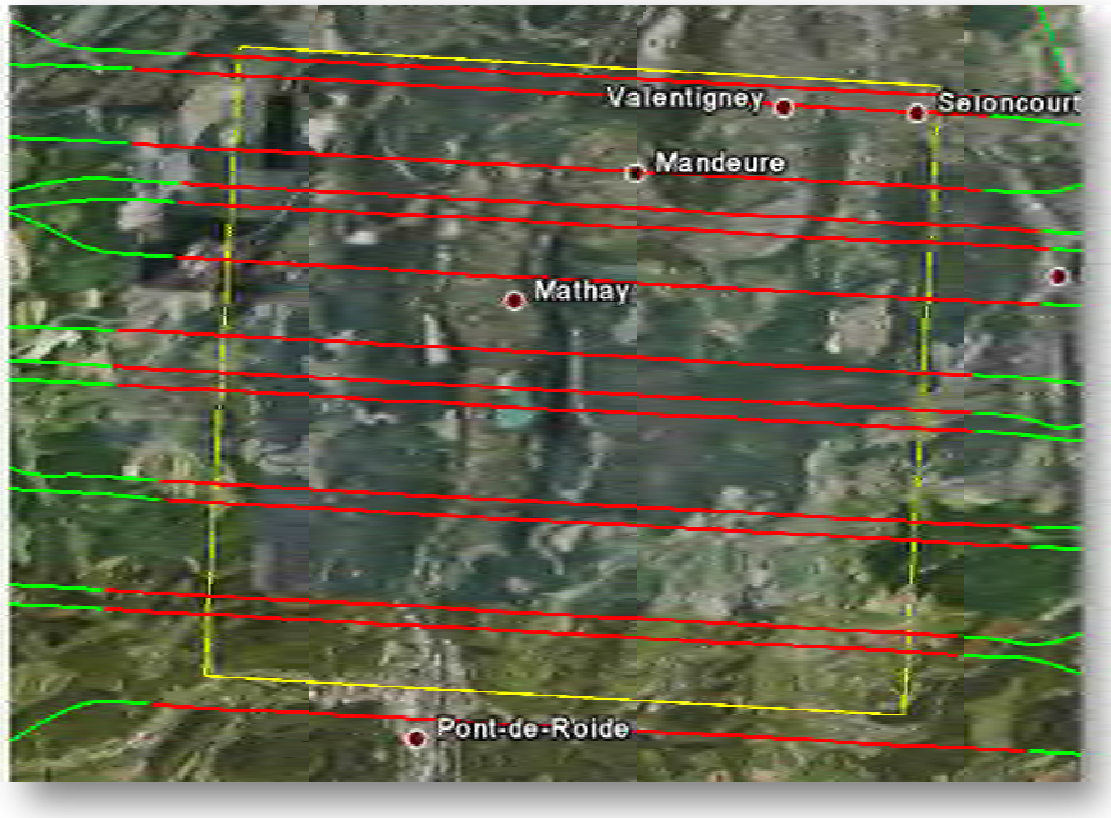
16

AERODATA - FLIGHT REPORT - N°:			285	DATE:	09/04/2009	
AIRCRAFT	C206 F-GDAP		TAF METEO :	Cavok		
PILOT	COGNACQ					
OPERATEUR	GERBAULT					
SENSOR	LM5600		vent théorique altitude		dérive théorique	
MONTURE			CAPACITE DE STOCKAGE Début de mission		CAPACITE DE STOCKAGE Fin de mission	
CCNS N°	3					
AEC N°/IMU N°	2/256Hz		Disk/Roll/HD	Nb	Disk/Roll/HD	Nb
Ashtec N°	/		D	22%	D	37%
NOM PROJET	projet WinMP AREA	Photo	Lidar	VITESSE Kt	Altitude en pied / sol	QNH
		GSD / ECHELLE	Pulse/Mode/Angle			
BESANCON	MANDEURE/LID-1		150/5/60°	90	1650-2460	1017
AD DEPART	Start Engine	Start recording		Stop Recording	Stop Engines	AD ARRIVE
LFQM	8:20	08:25		14:55	14:55	LFSM

AXE	stokage HD/MAG	Angle solaire	F/T	Heure debut	1er cliché	dernier cliché	Remarques
1	D			13:36:00			MANDEURE
-7	D			13:41:00			MANDEURE
13	D			13:48:00			MANDEURE
-19	D			13:55:00			MANDEURE
25	D			14:01:00			MANDEURE
-31	D			14:08:00			MANDEURE
37	D			14:14:00			MANDEURE
-30	D			14:20:00			MANDEURE
23	D			14:27:00			MANDEURE
-16	D			14:34:00			MANDEURE
9	D			14:40:00			MANDEURE
-2	D			14:46:00			MANDEURE

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

Mission du 09 avril 2009 (soir) : Secteur de Mandeure-Mathay



En rouge : les bandes de vol réellement acquises (14 axes)

En jaune : le secteur d'étude

En vert : les virages de l'avion (données laser non enregistrées)

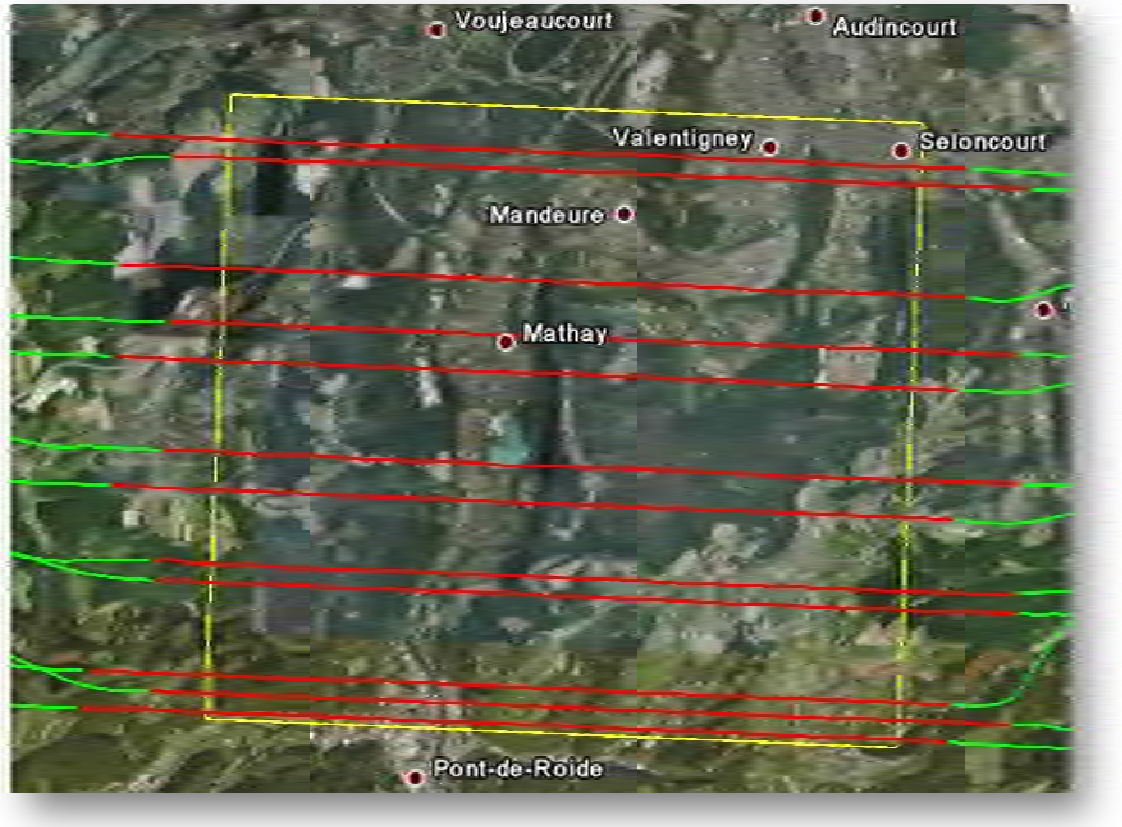
Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

AERODATA - FLIGHT REPORT - N°:			285	DATE:	09/04/2009 Soir	
AIRCRAFT	C206 FGDAP		TAF METEO :	Cavok		
PILOT	GERBAULT					
OPERATEUR	COGNACQ					
SENSOR	LM5600		vent théorique altitude		dérive théorique	
MONTURE			CAPACITE DE STOCKAGE Début de mission		CAPACITE DE STOCKAGE Fin de mission	
CCNS N°	3					
AEC N°/IMU N°	2/256Hz		Disk/Roll/HD	Nb	Disk/Roll/HD	Nb
Ashtec N°	/		C	44%	C	44%
			D	37%	D	55%
NOM PROJET	projet WinMP AREA	Photo	Lidar	VITESSE Kt	Altitude en pied / sol	QNH
		GSD / ECHELLE	Pulse/Mode/Angle			
BESANCON	MANDEURE/LID-1		150/5/60°	90	1650-2460	1017
AD DEPART	Start Engine	Start recording		Stop Recording	Stop Engines	AD ARRIVE
LFSM	16:30	16:35		18:35	18:35	LFSM

AXE	stokage HD/MAG	Angle solaire	F/T	Heure debut	1er cliché	dernier cliché	Remarques
-3	D			16:49:00			
8	D			16:56:00			
-14	D			17:04:00			
20	D			17:11:00			
-26	D			17:18:00			
32	D			17:26:00			
-38	D			17:33:00			
33	D			17:40:00			
-27	D			17:47:00			
18	D			17:53:00			
-10	D			18:01:00			
4	D			18:08:00			
-11	D			18:14:00			
21	D			18:22:00			

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

Mission du 10 avril 2009 (matin) : Secteur de Mandeure-Mathay



En rouge : les bandes de vol réellement acquises (12 axes)

En jaune : le secteur d'étude

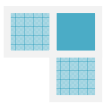
En vert : les virages de l'avion (données laser non enregistrées)

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

CHAPITRE 3

ACQUISITION DES DONNEES IMAGES

- CAMERA NUMERIQUE -



Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

C.1. Paramètres de vol

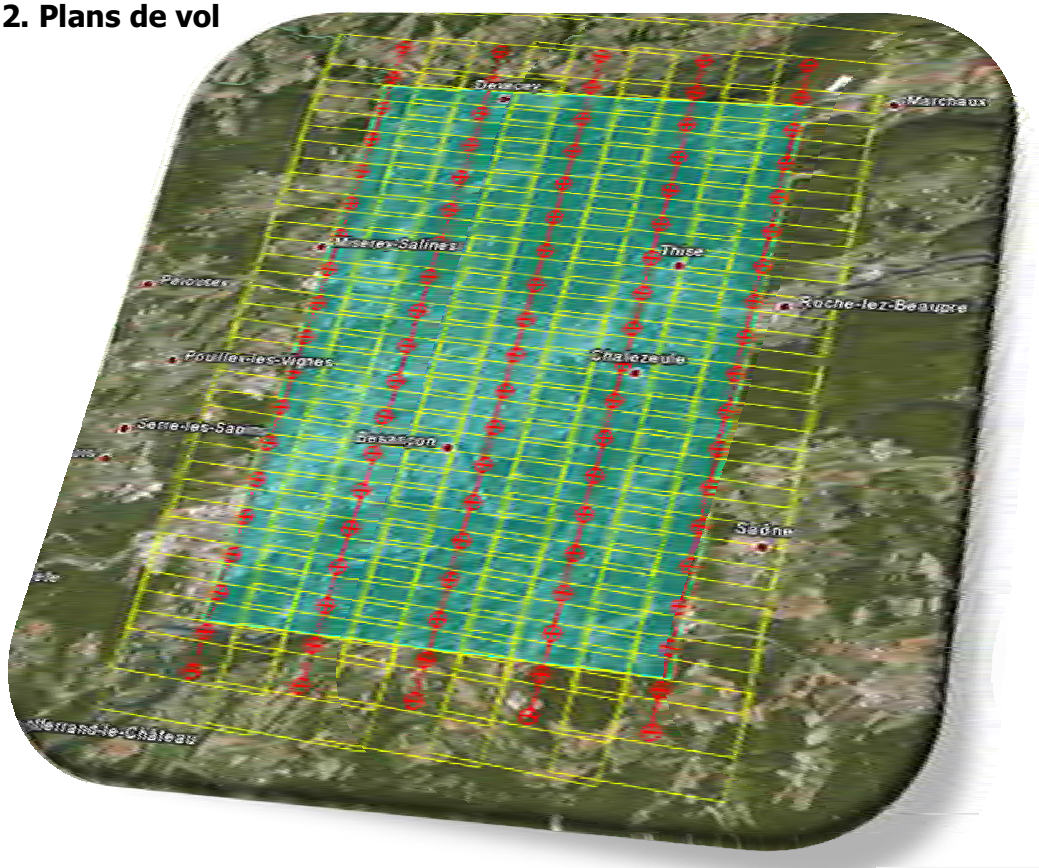


Une seule mission a été exécutée le 07 mai 2009 (2h30 de vol).

L'acquisition des données images (dans les 4 canaux : RGB + IR) a été réalisée avec la caméra numérique UltraCam-Xp, développée par la société Vexcel/Microsoft Corp.

Paramètres généraux	**Valeur**
Hauteur de vol	3 350 m
Vitesse de vol	100 nœuds
Distance entre axes de vol	1 420 m
Distance entre clichés	905 m
Recouvrement longitudinal	60%± 5%
Recouvrement latéral	30% ± 5%
Focale	100,5 mm
Taille de l'image au sol dans le sens du vol	2 260 m
Taille de l'image au sol dans le sens perpendiculaire au vol	3 460 m
Résolution du pixel au sol (natif)	**20 cm**

C.2. Plans de vol



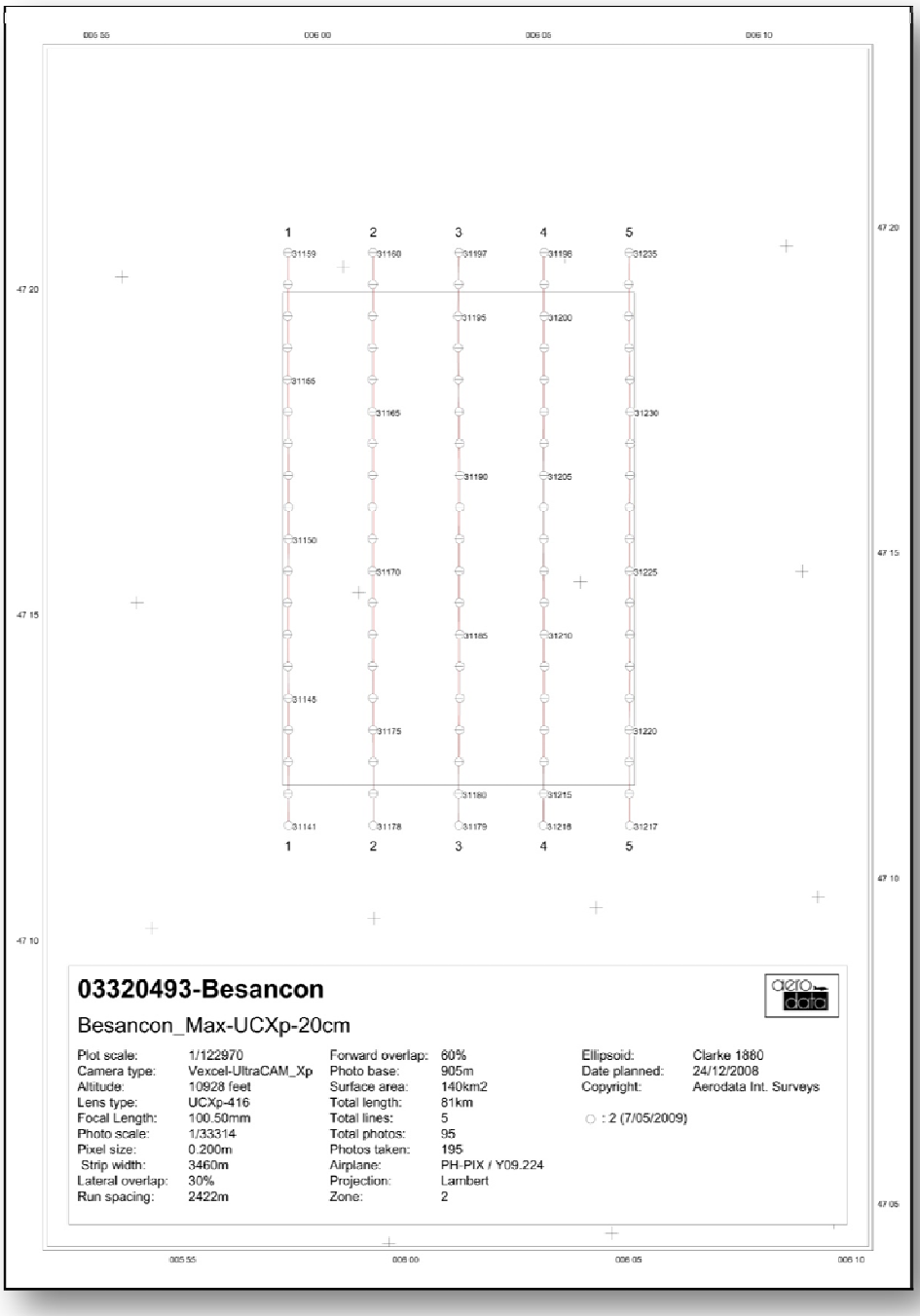
<u>En jaune</u> : emprise stéréoscopique des clichés
<u>En rouge</u> : axes de vol et centres de cliché
<u>En bleu</u> : limite du territoire

BESANCON

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

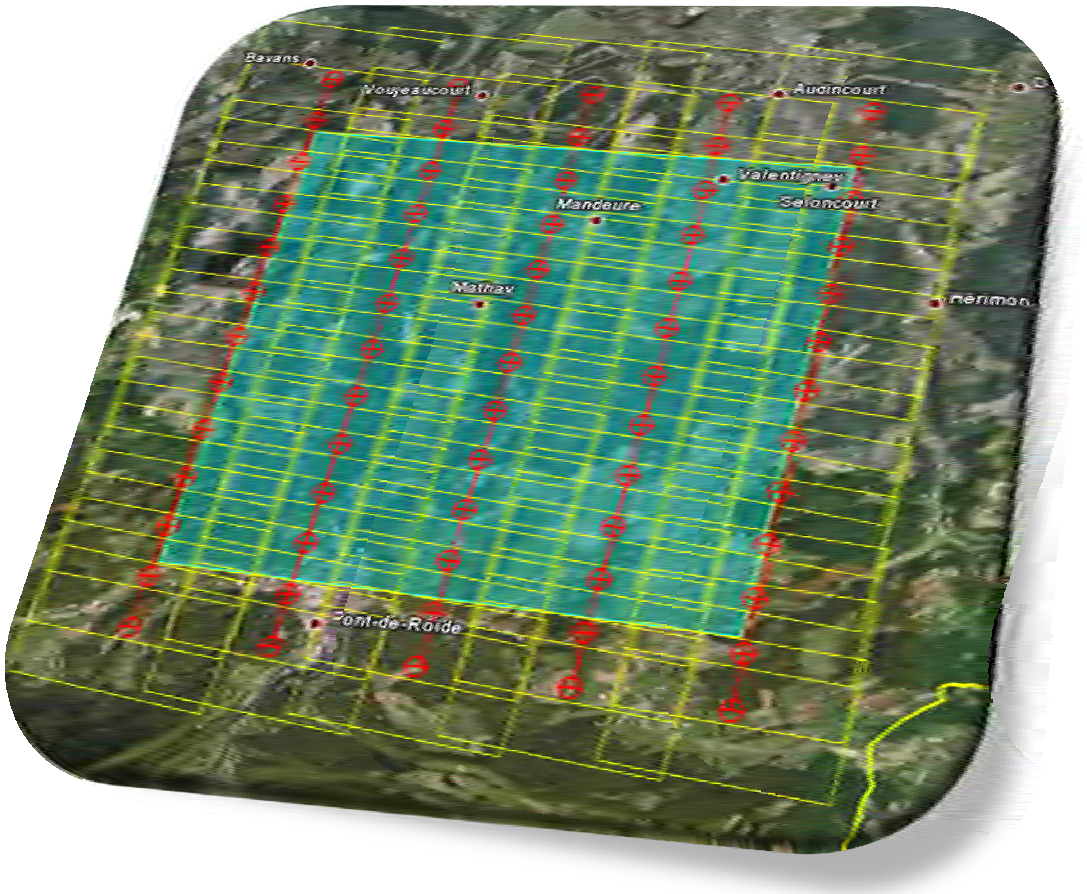
22

Secteur de Besançon



Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

23



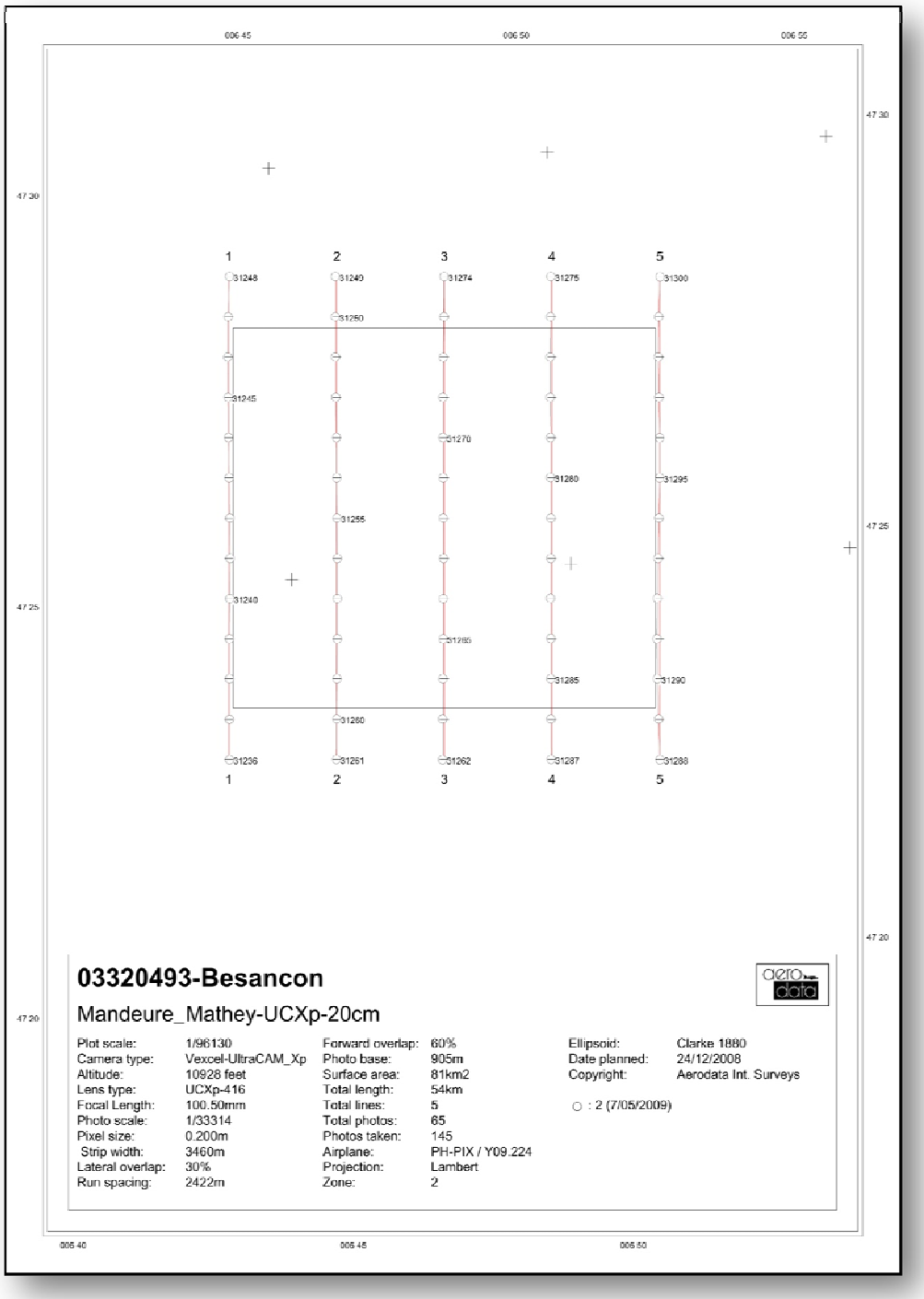
<u>En jaune</u> : emprise stéréoscopique des clichés
<u>En rouge</u> : axes de vol et centres de cliché
<u>En bleu</u> : limite du territoire

MANDEURE-MATHAY

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

24

Secteur de Mandeure-Mathay



Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

C.3. Rapport de vol

AERODATA
International Flight Operations

FLIGHT REPORT
DIGITAL IMAGING

FLIGHT: Y09- 224

DATE : 7/05/2009 Julian: 127
AIRCRAFT : PH-PIX Type: SWIII
PILOT : Jan Possemiers
2nd PILOT : Nicolas Vandenabeele
OPERATOR : Stephan Bot
2nd OPR/PAX : Jurgen Decraemer
SENSOR : Vexcel UCXp Ser.No.416
FOCAL : 100.5 mm
GPS UNIT : Applanix 510

Start Engir 6:25 UTC
Stop Engines: 12:40 UTC
Route: Clock: 6:15 Hr/Min
Departure: EBAW
Arrival: LFST(Strasbourg)
OBSERVER:

Take-off: 6:39 UTC
Landing: 12:37 UTC
Flight Time: 5:58 Hr/Min

Applanix Start Logging: UTC
Aircraft Start Moving: UTC
Aircraft Stop Moving: UTC
Applanix Stop Logging: UTC

FMS UNIT: TECI 01
Mount: Somag GSM 3000 (1)

PROJECT No.	Flight Plan Name	GSD	PIR No.	Exposures	Image Data File Name	%	ToT	GALT(ft)	OAT	QNH
3327911	AUP-PEMI_UCXp-44cm	44cm	1	124	AUP_PEMI_1	85	1:13	24370	-20	1021
3320493	Besancon_Max-UCXp-20cm	21cm	2	95	Besancon_2	100	0:28	12400	0	1020
3320493	Mandeure_Mathey-UCXp-20cm	20	2	65	Mandeure_Mathey_2	100	0:25	12400	0	1020
3327911	AUP-LOUI_UCXp-41cm		1	115	AUP_LOUI_1	50	0:44	24400	-20	1020

Totals: 399 exposures 2:52 Time over target

Data Units A / B	Pir No.	Run Number	Start UTC	Track	Exp.	F/	PDOP Sats	Exposure Numbers Start	<>	Stop	Waypoints	Remarks:
DU-07												First No perm. Besancon: MIL
DU-05	1	1	8:30	271	"	"	1/8	31017	-	31038	22	AUP-PEMI FL240
		2	8:40	89	"	"	1/8	31039	-	31061	23	
		3	8:48	272	"	"	1/8	31062	-	31084	23	
		4	8:59	91	"	"	1/8	31085	-	31107	23	
		5	9:09	270	"	"	1/8	31108	-	31126	19	118,124,124: Cu
		6	9:18	91	"	"	0.9/9	31127	-	31140	14	Rejected due to Cu
	2	1	10:06	360	"	"	1/9	31141	-	31159	19	Besancon / 500ft high(FL120)
		2	10:12	183	"	"	1/9	31160	-	31178	19	
		3	10:18	2	"	"	1/9	31179	-	31197	19	
		4	10:24	183	"	"	1/9	31198	-	31216	19	
		5	10:31	2	"	"	1.2/8	31217	-	31235	19	completed
	2	1	10:44	4			1.3/7	31236	-	31248	13	Mandeur_Mathey FL120
		2	10:50	183			1.2/8	31249	-	31261	13	
		3	10:56	3			1.2/8	31262	-	31274	13	
		4	11:02	183			1/9	31275	-	31287	13	
		5	11:08	3			1/9	31288	-	31300	13	completed
									-			
									-			
									-			
									-			

Remarks: Due to bad accuracies(4km) on the Applanix we performed an in-air-alignment @ 10:00z: everything OK again afterwards

Flight Conditions: Besancon/Mandeure Mathey: sky clear

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

CHAPITRE 4

CANEVAS PHOTOGRAMMETRIQUE



Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

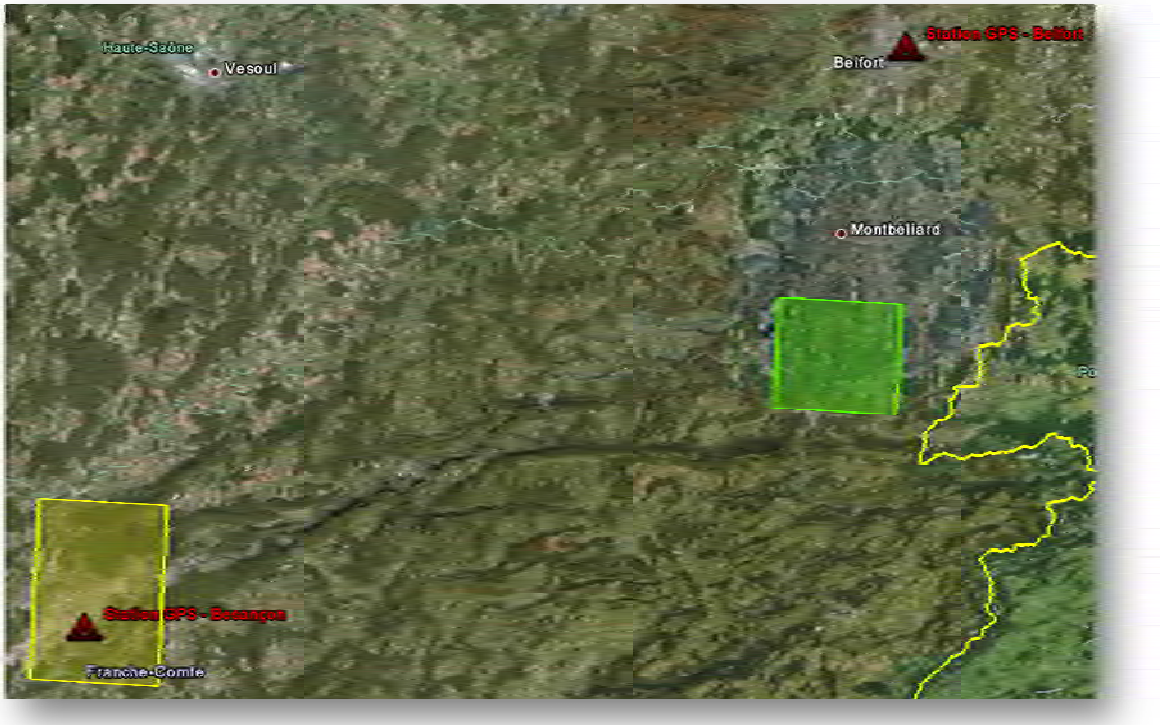
Cette étape consiste à calibrer et géoréférencer tous les bandes de vol (position et attitude) à partir de mesures GPS et inertielles effectuées pendant les vols, ainsi que des points de contrôle levés au sol.

D.1. Au sol

Station de référence :

Deux stations de référence, ou pivots, ont été utilisés lors des vols pour effectuer le positionnement de l'avion en mode différentiel. Ces mesures GPS, en parallèle avec celles acquises à bord de l'avion, ont servi au calcul de la trajectographie.

Il s'agit des stations permanentes du réseau IGN/TERIA, localisées respectivement à **Besançon** et **Belfort**. Elles sont situées dans un rayon de 25-30 km des zones à survoler.



Surface de référence altimétrique pour l'acquisition laser :

Afin de garantir un parfait ajustement du bloc de données sur le terrain et une précision altimétrique inférieure à 20cm, nous avons demandé à un cabinet de géomètre-expert local (Mr Frédéric JAMEY), basé à Besançon, de lever une surface dite « de référence » sur chacun des secteurs cartographiés.

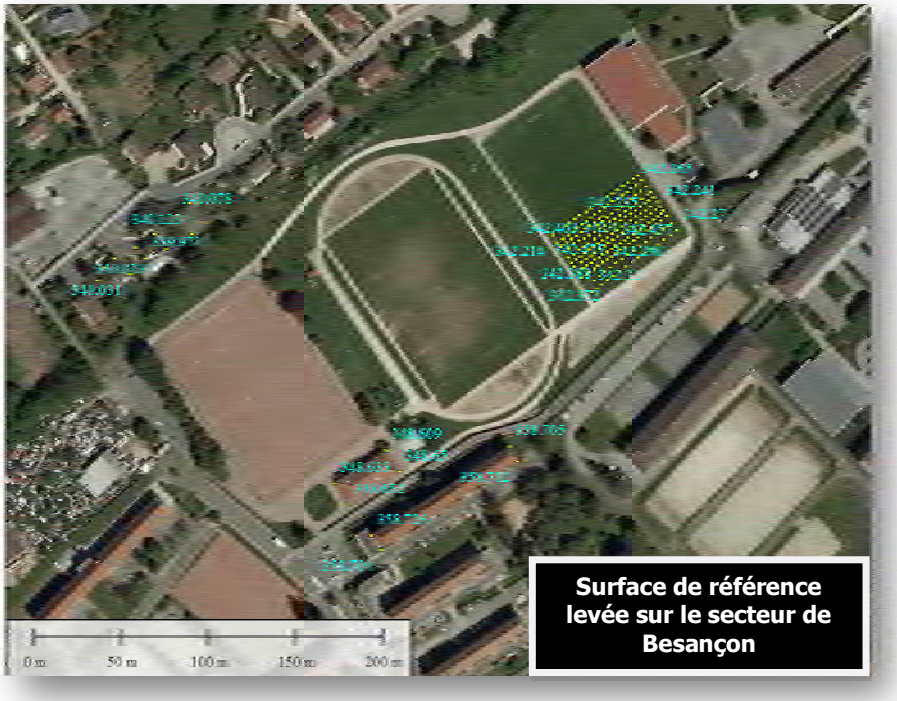
Ces surfaces, relativement planes et dégagées, représentent une superficie à d'environ 2000m² (terrain de foot ou parking de grandes zones commerciales)

La différence altimétrique entre les points levés sur le terrain et ceux extraits des données LiDAR (MNT) est en moyenne de l'ordre de 5 cm.

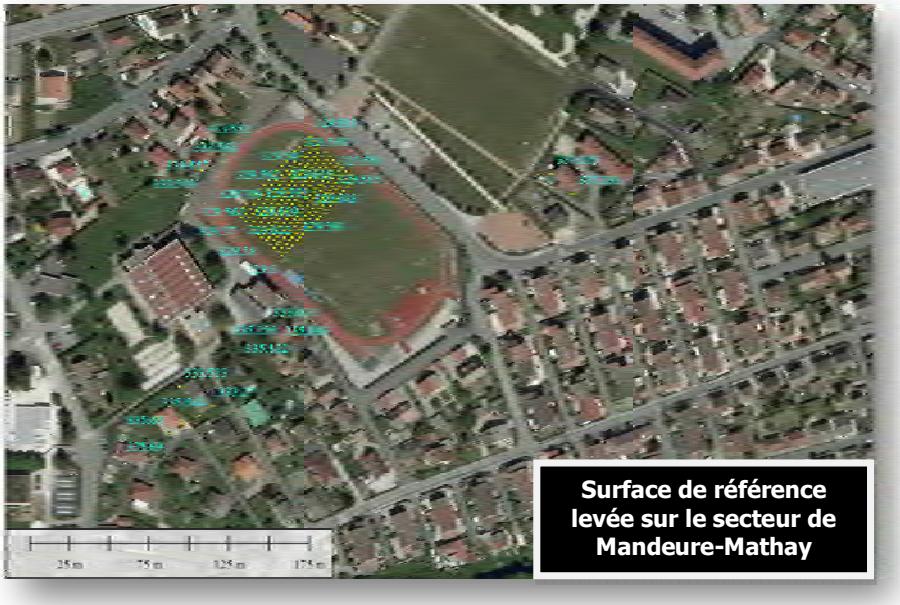
Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

28

Nous avons également pris l'initiative de relever sur chacune de ces surfaces, la coordonnée XYZ des quatre coins du toit (niveau de gouttière) de 2-3 bâtiments à proximité.



Surface de référence levée sur le secteur de Besançon



Surface de référence levée sur le secteur de Mandeure-Mathay

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

Points de contrôle pour la prise de vues numériques :

Les points de contrôle servent à caractériser la précision obtenue sur l'orthophoto finale. Ce sont des points qui n'entrent donc pas dans le calcul du calage de l'orthophoto. Notre bloc de photos étant homogène et non lié à des points d'appui, le nombre de points de contrôle est seulement choisi de manière à ce que les écarts observés soient significatifs pour estimer la qualité du produit.

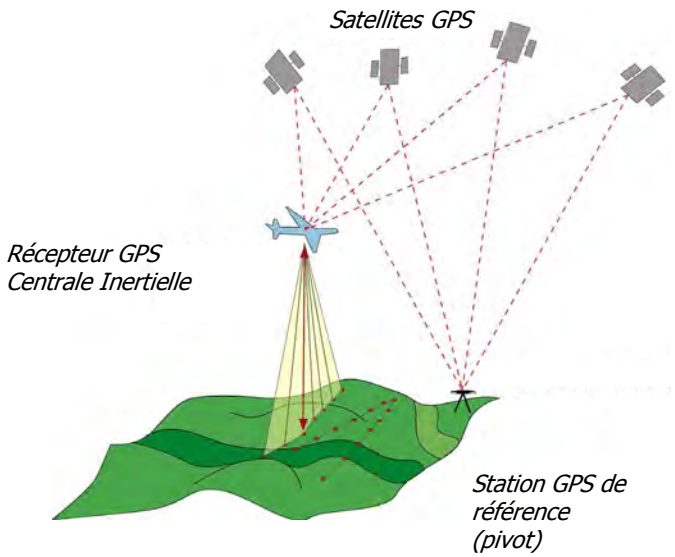
D.2. Pendant le vol

Lors des différentes missions aériennes, le système de navigation utilisé par Aérodata France a été le Trackair EZ/Track et le CCNS4 d'IGI Hilchenbach (Allemagne).

Les mesures GPS :

Au cours du vol, la position de l'avion a été mesurée en continu à raison de 1 position par seconde. Il s'agit d'un positionnement GPS différentiel, dont les pivots (ou stations de référence) sont positionnées sur des points connus au sol, le récepteur mobile étant à bord de l'avion.

Pendant les vols, les données ont simplement été enregistrées, les calculs étant effectués en post-traitement.



Les mesures inertielles :



Le système AEROControl (cf. www.igi-systems.com) intègre un système inertiel et un système GPS (GPS/INS). Il permet de déterminer avec une grande précision la position (latitude, longitude et altitude) et l'orientation (tangage, roulis et lacet) des centres de perspective de chaque cliché au moment de l'exposition. Il est ainsi possible de réduire ou même d'éliminer les travaux terrain servant à la mesure de points d'appui et également par conséquent les calculs d'aérotriangulation.

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

Le système AEROControl utilise les données de la station GPS la plus proche de la zone d'opération (Besançon ou Belfort dans notre cas).

La combinaison des mesures GPS et INS :

Cette combinaison vise à tirer profit des atouts des deux instruments présentés ci-dessus. Le GPS offre des positions indépendantes du temps mais à une fréquence faible ; l'INS offre une fréquence de mesure importante mais dérive dans le temps. Les mesures GPS permettent de « recaler » celles de l'INS.

D.3. Au bureau

Calcul de la trajectographie :

La trajectographie a été calculée à l'aide d'un logiciel spécifique (AeroOffice), combinant les mesures GPS et INS selon le principe présenté à la page précédente.

D.3.1. Pour l'acquisition laser : Calcul de la trajectographie

Le résultat du calcul de la trajectographie est une trajectoire de l'avion connue avec une précision meilleure que 10 centimètres en X,Y,Z.

Conformément à notre expérience, la précision finale au sol résultant du calage des photos, influence de la position des sommets de prise de vue et des angles d'attitude compris, est meilleure que 15 cm (erreur moyenne quadratique) pour un vol à moins de 1000 mètres.

La précision de la trajectographie est contrôlée et documentée en s'appuyant sur les surfaces de référence réparties sur la zone à couvrir.

D.3.2. Pour la prise de vues numériques : Stéréopréparation et Aérotriangulation

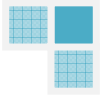
Stéréopréparation :

C'est l'opération destinée à déterminer la position (X, Y et/ou Z) de points parfaitement identifiables sur les photographies, en projection Lambert II Etendu. Elle peut porter sur un ou quelques couples isolés ou un ensemble de couples d'un bloc en vue d'une aérotriangulation.

Les points de stéréopréparation préalablement identifiés doivent être tels que :

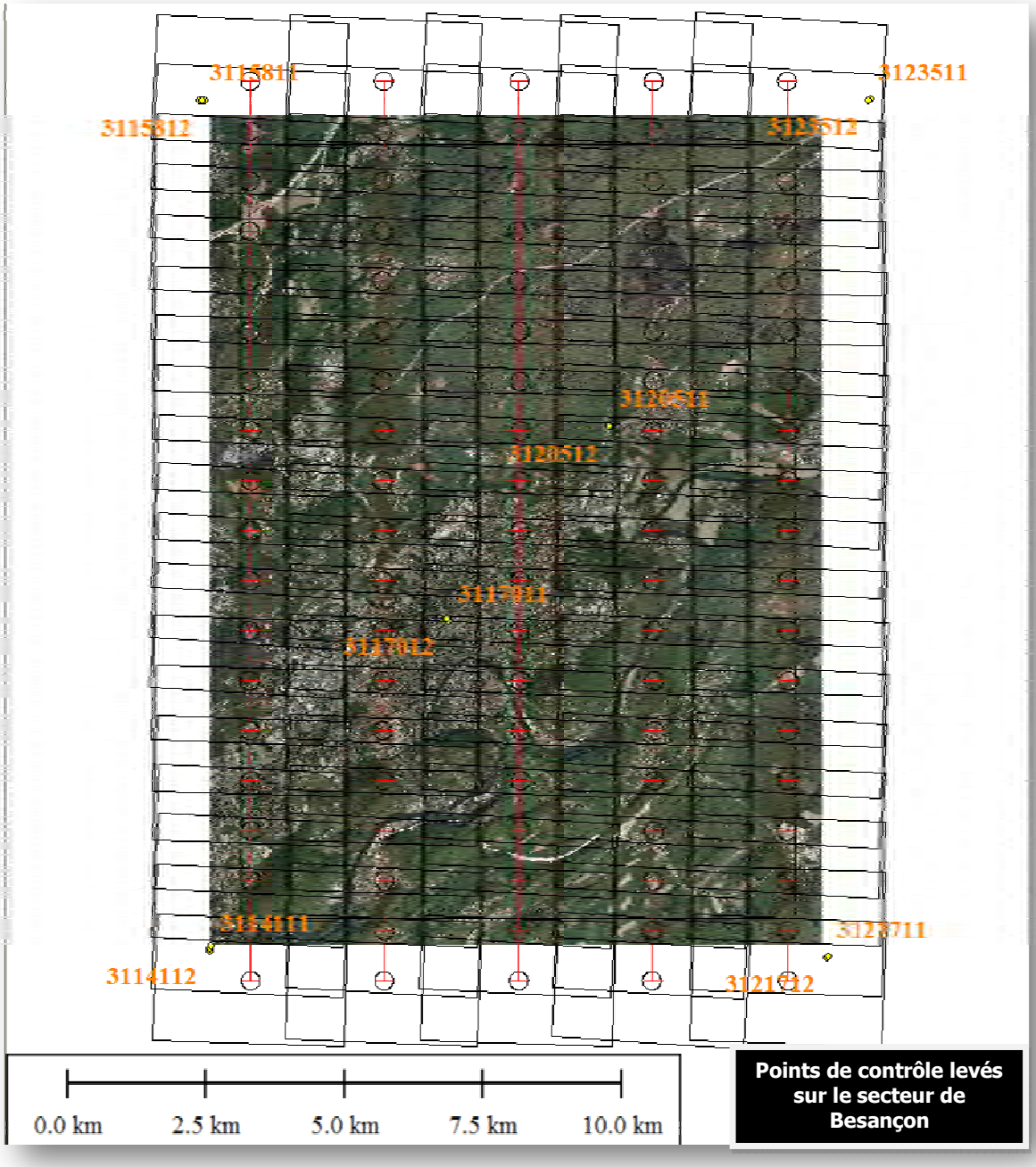
- aucun d'entre eux ne se situe à moins de 1 cm du bord des images ;
- leur image photographique soit repérable en atelier avec une grande précision : bonne définition géométrique du détail retenu, bon contraste photographique ;
- la taille de l'image soit voisine de 50 microns à l'échelle des clichés ;
- la zone de terrain environnante soit plate ;
- les éléments naturels retenus aient un caractère de pérennité ;
- leur image soit correcte sur tous les clichés correspondants lorsqu'ils sont communs à plusieurs couples ou bandes

18 et 25 points naturels (dits de contrôle) ont été respectivement levés sur les secteurs de Besançon et Mandeure-Mathay, par le cabinet de géomètre-expert local (Mr Frédéric JAMEY). Aucun prébalisage n'a donc été effectué.



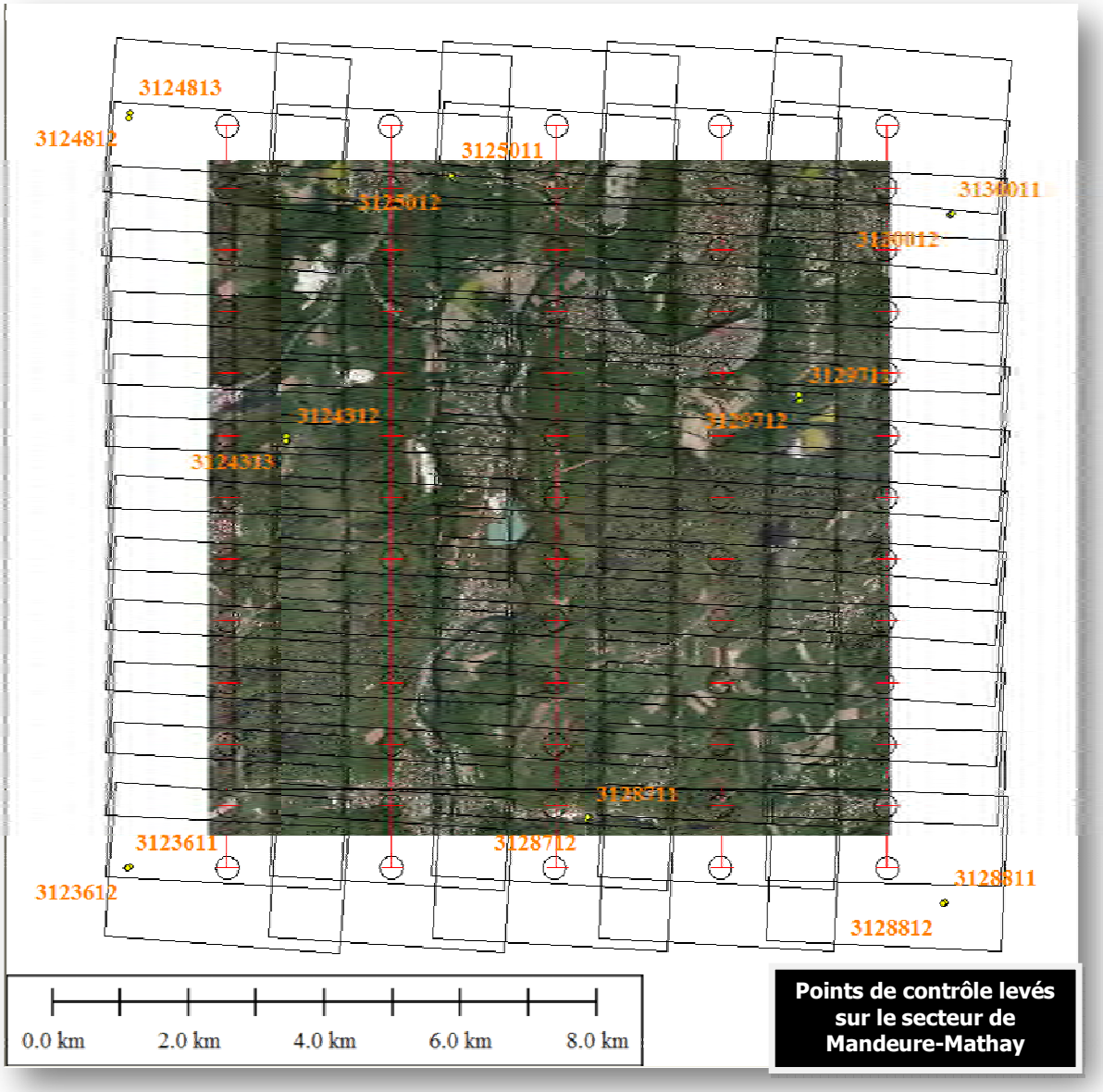
Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

31



Points de contrôle levés sur le secteur de Besançon

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés



Points de contrôle levés sur le secteur de Mandeure-Mathay

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

Exemple de fiche signalétique transmise au cabinet de géomètre-expert local (Mr Frédéric JAMEY) :

FICHE SIGNALETIQUE N° 5-31235-1

aero data

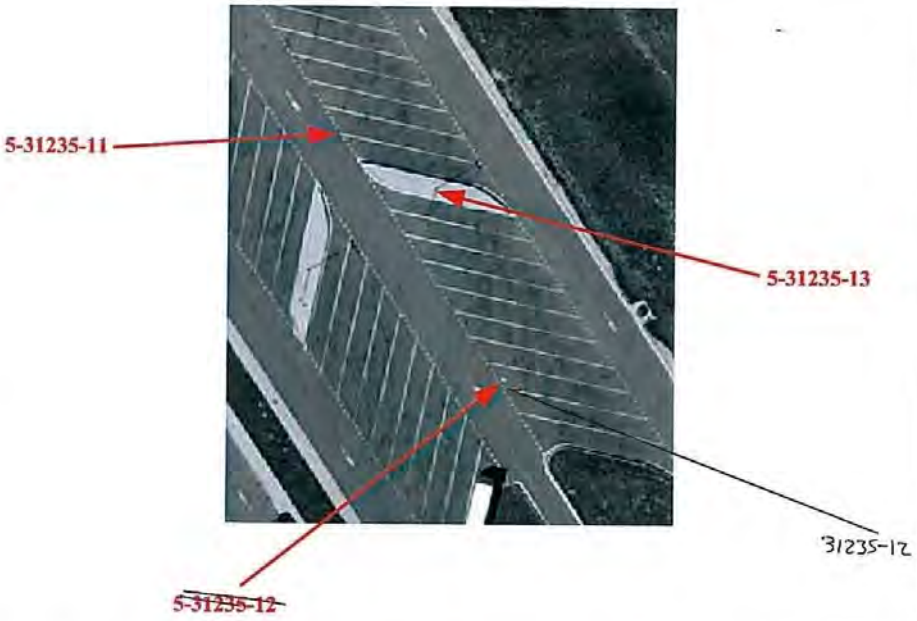
N° DOSSIER : 08/0321

INTITULE : Besançon

DATE DE PRISE DE VUES : 7 Mai 2009

ECHELLE DES CLICHES : Pixel 20 cm

PRISE DE VUES REALISEE PAR : AERODATA

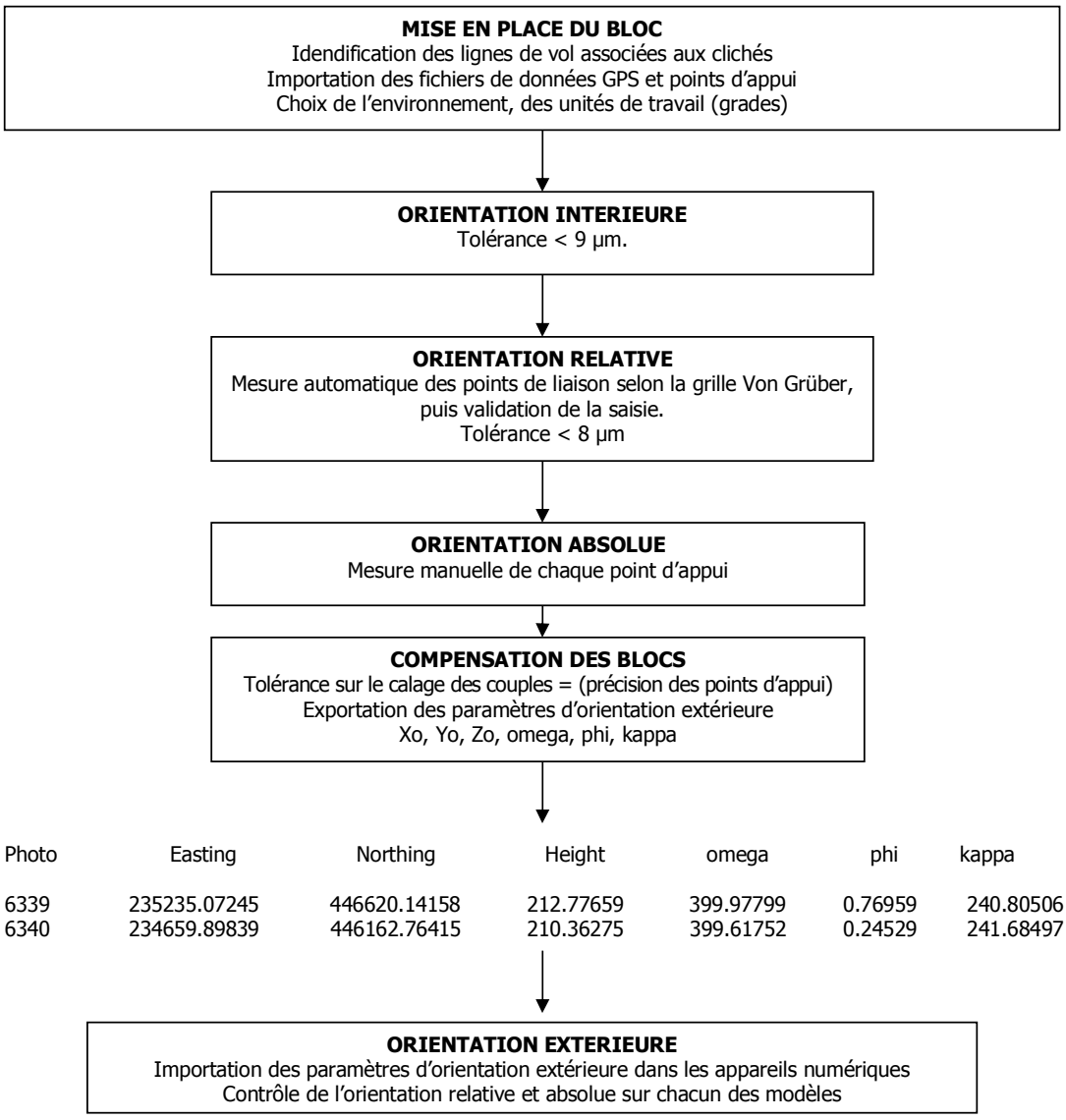


POINT N°	CLICHE N°	NATURE DU POINT X-Y	X	Y	NATURE DU POINT Z	Z
5-312357-11	5-31235	AXE EXTREMITE BANDE BLANCHE			SOL	
5-31235-12	5-31235	~~AXE TACHE BLANCHE~~ n'existe pas donc extremite bande blanche Axe.			SOL	
5-31235-13	5-31235	AXE PIED LAMPADAIRE			SOL	

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

Aérotriangulation par bloc :

L'aérotriangulation livre les éléments d'orientation de toutes les photos ou de tous les stéréomodèles (Omega, Phi et Kappa), ainsi que les coordonnées (X, Y et Z) des points mesurés dans un système de coordonnées-terrains, zone Lambert II Etendu dans notre cas.



- Organigramme de l'aérotriangulation -

Nous avons combiné la sélection de points interactive avec une mesure automatique des points homologues.

L'ajustement des mesures, c'est-à-dire du ou des blocs finaux, a été réalisé avec le logiciel de compensation par faisceaux MATCH-AT, développé par la société allemande Inpho Gmbh.

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

CHAPITRE 5

DONNEES LASER BRUTES
GENERATION DU MNT



Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

E.1. Livraison des données laser brutes

Un fichier de semis de points « BRUT » (cf. Définitions, p.4) a ét livré à l'issu de la mission LIDAR, en projection Lambert II Etendu (Z/IGN 69).
Il s'agit d'un fichier de points classés (premier et dernier écho), sans distinction végétation-bâti. La confection de ce produit est nécessaire pour l'obtention des semis de points filtrés (cf. § D.2. du présent document).

Il a été livré au format ASCII, 8 colonnes (1- Temps GPS, 2- X, 3- Y, 4- Z, 5- Intensité, 6- Numéro d'ordre de l'écho, 7- Nombre d'échos, 8- Angle du laser) espacées par un espace.
Compte tenu de la taille des fichiers mis en jeu, nous avons effectué un découpage en tuiles rectangulaires (dimension 500m x 500m) : 765 dalles pour le secteur de Besançon et 488 dalles pour le secteur de Mandeure-Mathay.

L'ensemble des données a été fournie sur disque dur externe.

Le scanner laser Riegl LMS-Q560 nous permet de collecter l'intensité du signal réfléchi par chaque objet. Cette information vient compléter les données topographiques acquises lors du lever. Elle permet de filtrer ou classifier avec beaucoup plus d'efficacité, de précision et de pertinence les couches bâti, végétation, hydro et surfaces dures.

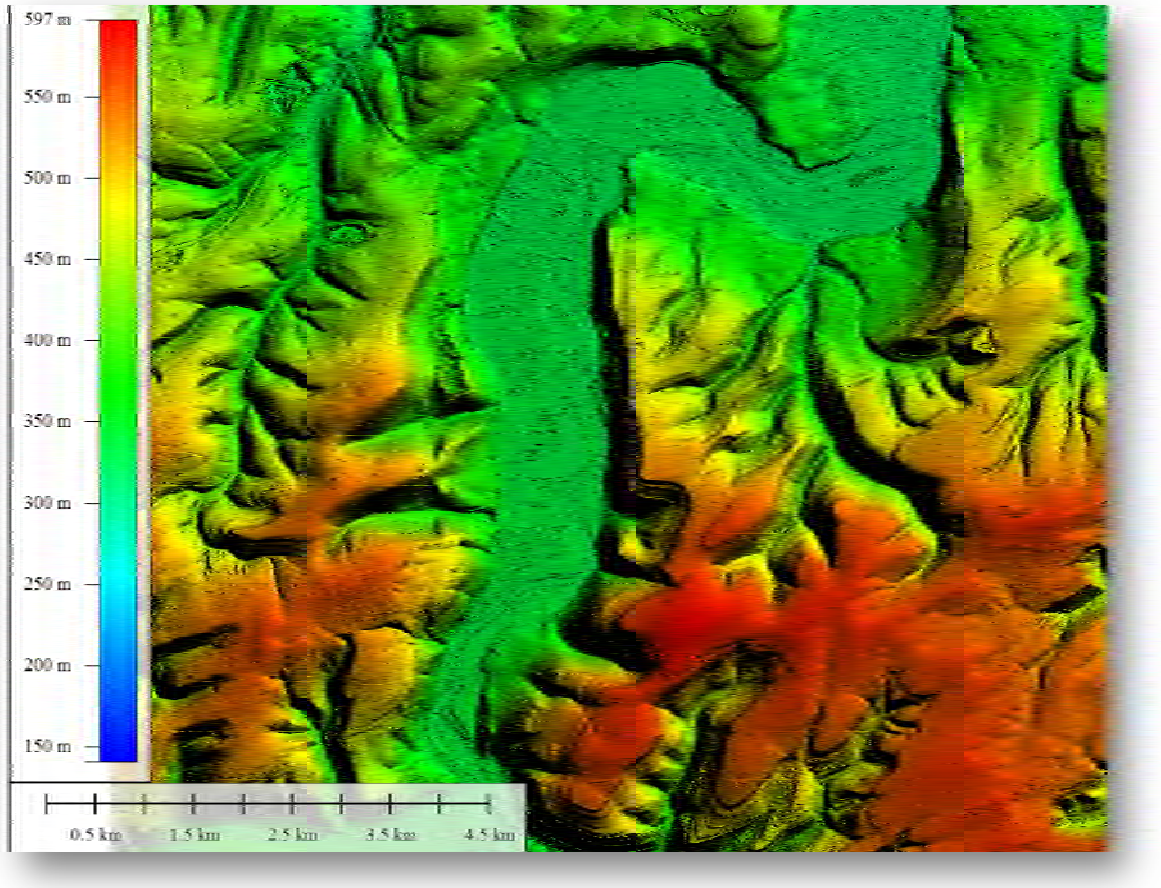


- Données d'intensité acquise sur le secteur de la Citadelle, à Besançon -

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

E.2. Un MNT issu des données laser

Le MNT a été créé à partir des données laser brutes acquises. La phase essentielle consiste à filtrer ces données afin de n'inclure dans le MNT que celles qui décrivent effectivement le sol et les infrastructures artificielles qui doivent être incluses dans le MNT.



- Extrait du MNT réalisé sur le secteur de Mandeure-Mathay, pas de 50cm -

Le filtrage des données laser a été réalisé avec le logiciel Terrascan développé par la société finlandaise Terrasolid. Terrascan, également utilisé par la MSHE CLAUDE NICOLAS LEDOUX, est un outil dédié à la classification des données laser, et est appuyé sur Microstation (Bentley).

Une partie du filtrage a été réalisée de manière automatique et contrôlée interactivement, tandis qu'une autre est directement réalisée par un opérateur averti et expérimenté.

La macro utilisée pour le filtrage sous Terrascan a été transmise par courriel à la MSHE CLAUDE NICOLAS LEDOUX.

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

Les infrastructures artificielles telles que les murs de soutènement, les talus ou digues, les réseaux routiers, les bretelles d'autoroutes « au sol », sont automatiquement classées en points sol.

Lors de la phase d'édition du MNT, les photos acquises en parallèle avec les données laser sont utilisées afin de lever les éventuelles interrogations de l'opérateur quant à l'interprétation du terrain.

E.2.1. Liste des objets intégrés dans le MNT

Sauf spécification expresse et contraire du Maître d'Ouvrage seront intégrés au MNT, dans un seul calque et sans discrimination, les objets suivants :

- sol naturel
- murs de soutènement, talus, digues
- remblais/déblais des réseaux routiers, bretelles d'autoroutes

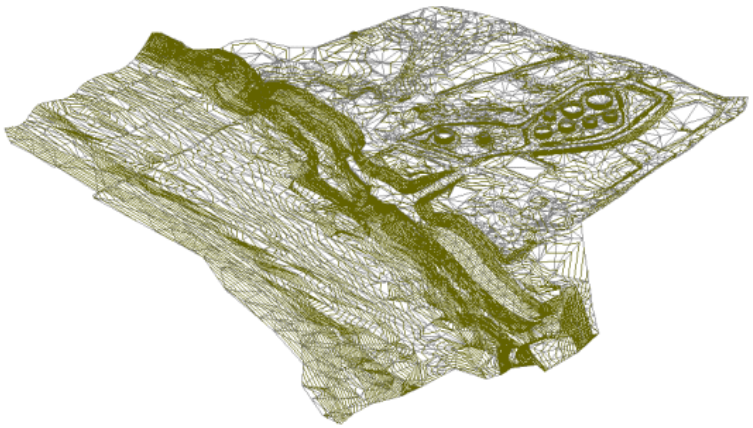
Seront exclus du MNT :

- les bâtiments
- la végétation
- les voitures, piétons, panneaux, etc.
- ouvrages d'art (incluant ponts, viaducs)

A noter que, comme les ponts ont tous des tailles différentes, il arrive parfois que l'algorithme utilisé pour le filtrage classifie certains de ces ouvrages en terrain naturel, et d'autres non.

E.2.2. Format de livraison

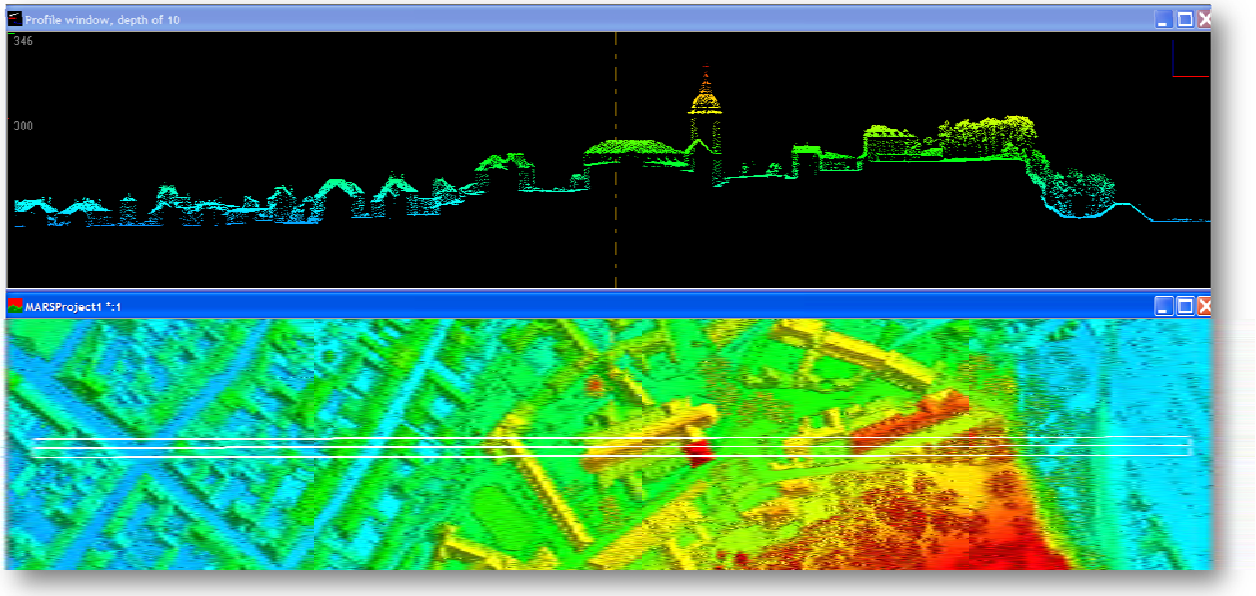
Le MNT a été livré aux formats ASCII et Raster Grid, avec un semis de points côtés espacés régulièrement tous les 50cm. Comme les données laser brutes, il sera découpé sous forme de dalles élémentaires (500m x 500m), associé avec son tableau d'assemblage.



Nous avons également calculé pour le semis de points bruts « MNT », généré précédemment, une surface triangulée (TIN), basé sur l'algorithme de Delaunay (cf. figure ci-dessous). Cette opération a été associée à un ré-échantillonnage des données selon la méthode des plus proches voisins. C'est à partir de ce TIN que nous avons convertis les fichiers « MNT » dans un format RASTER Grid (pas de 50cm), via le logiciel Global Mapper.

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

39

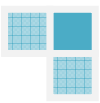


- Profil en travers au pied de la Citadelle de Besançon (coupe Est-Ouest) -

Aerodata France | Copyright 2009 © Tous droits réservés

CHAPITRE 6

CONFECTION DE L'ORTHO



Aerodata France | Copyright 2008 © Tous droits réservés

F.1. Généralités

La génération de l'orthophoto numérique est divisée en deux étapes de travail qui sont :

- le redressement différentiel d'un cliché d'orientation externe connue à l'aide du modèle numérique de terrain, filtré à partir des données laser ;

- la correction radiométrique et/ou le rehaussement global de l'image, afin d'assurer un beau rendu, sans plage hyperlumineuse (ou « *Hot Spot* »).

L'orthophotographie a été confectionnée uniquement sur l'emprise couverte par le LiDAR. Le territoire couvert par les images, mais ne disposant pas de données laser, n'a donc pas été orthorectifié, mais masqué par une couleur unique d'arrière-plan (blanc, noir ou autre).

F.2. Redressement différentiel

Sur une orthophoto, seuls les objets fidèlement décrits par le modèle altimétrique ont été correctement reproduits en planimétrie. Par conséquent, le problème principal du redressement géométrique différentiel se situe au niveau :

1. Du phénomène du déplacement radial de l'image dans le cas de vues prises en perspective centrale, en particulier du déplacement planimétrique d'objets non contenus dans le modèle altimétrique (tels que les arêtes faîtières de toits ou les cimes des arbres) ;
2. De la qualité du modèle de terrain utilisé.

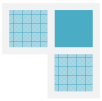
Le déplacement de l'image sur l'orthophoto est fonction :

1. De la distance principale (f) – plus la focale est courte, plus les angles sont ouverts et les déplacements radiaux élevés ;
2. De l'extrait de cliché utilisé ou de la distance maximale au point central du cliché (ρ') – plus l'extrait de cliché est étendu, plus le déplacement de l'image est élevé ;
3. De l'erreur altimétrique ou de l'altitude d'un objet non modélisé (ΔZ) ;
4. De la déclivité locale du terrain (α) : le déplacement est plus important lorsque le terrain est incliné à partir du point central de l'image : "l'eau s'écoule en direction du bord du cliché".

F.3. Qualité de l'image

La qualité des images numériques est améliorée par les traitements radiométriques suivants :

- Réduction des anomalies de contraste et de couleur liées à l'angle d'incidence des rayons solaires, aux conditions atmosphériques et à l'objectif photographique ;
- Egalisation radiométrique sur l'ensemble des images composant la mosaïque ;
- Rehaussement global en couleur de chaque « bloc d'aérotriangulation », après orthorectification.



Aerodata France | Copyright 2008 © Tous droits réservés

Raccords géométriques

Chacun des pixels de l'orthophotographie est issu du cliché dont le nadir est le plus proche voisin du pixel (uniquement la partie centrale de chacun des clichés sera exploitée). Les limites ont été définies selon le diagramme de Voronoï et retouchées pour garantir un raccord des réseaux et des espaces bâtis meilleur que l'EMQ. Nous avons traité de la même manière les raccords entre blocs.

F.4. Mosaïquage et dallage

La génération de mosaïques d'orthophotos optimales sur le plan radiométrique impose de compenser voire de corriger toute une série de phénomènes. Ces compensations ont été effectuées préalablement au mosaïquage ou durant ce processus et se traduisent par l'exécution d'opérations appropriées d'adaptation du contraste des clichés (« *Image Dodging Operations* »).

Les corrections ont concerné les points suivants :

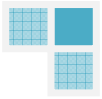
- Intégration/Fusion de l'orthophotoplan existant avec les nouvelles orthophotographies générées afin d'obtenir une radiométrie globale et homogène du nouveau territoire ;
- Réflexion en fonction de la direction – La direction du rayonnement solaire fait que certaines parties des clichés aériens seront plus claires (photographiées "avec" le soleil) que d'autres (photographiées "contre" le soleil). Dans le cas de vols photogrammétriques effectués vers midi, il en résulte par exemple une baisse de luminosité du bord sud vers le bord nord. Ce gradient de valeurs de gris n'est pas perceptible au niveau d'une seule orthophoto, mais ces écarts de valeurs de gris peuvent en revanche occasionner de notables perturbations à plus grande échelle, au niveau d'une mosaïque ;
- Plage hyperlumineuse (« *Hot Spot* ») – Une plage hyperlumineuse désigne une zone très localisée du cliché présentant une luminosité bien supérieure à celle de son environnement. En photogrammétrie aérienne, une plage hyperlumineuse perturbatrice peut être visible à l'endroit de la réflexion solaire directe, selon la nature de la surface réfléchissante ;
- Perte de luminosité du centre du cliché vers ses bords – Les objectifs photogrammétriques présentent une perte de luminosité du centre du cliché vers ses bords. Elle est particulièrement prononcée dans le cas d'objectifs grands-angles ou super grands-angles. Cette perte de luminosité est entre autres influencée par le phénomène dit de vignettisation, c.-à-d. le rétrécissement mécanique d'un rayon lumineux entrant de manière oblique dans un système optique.

Nous avons apporté une attention particulière au produit final, afin de préserver l'intégrité des réseaux routiers et ferrés, des bâtiments et des objets du paysage. Chacun des raccords générés a été contrôlé par l'opérateur avant toute confirmation de mosaïquage.

L'orthophotoplan numérique a été livré en couleur vraie et en infrarouge couleur.

Elle a été découpée par dalle élémentaire de dimension 1 km x 1km.

Comme les données LiDAR, les images, aux formats GEOTIF/TFW et ECW (compression 10x), ont été copiées et livrées sur un disque amovible externe (port USB 2).



Aerodata France | Copyright 2008 © Tous droits réservés

43

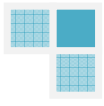




Aerodata France | Copyright 2008 © Tous droits réservés

CHAPITRE 7

DROITS D'USAGE / CONTACT



Aerodata France | Copyright 2008 © Tous droits réservés

G.1. Droits d'utilisation

Les données brutes, tous les produits, sous produits et produits intermédiaires permettant de répondre au présent cahier des charges seront propriété de la MSHE C.N. Ledoux.

Toutefois, tel que discuté lors de la réunion du 06 Novembre 2009, Aerodata France se réserve un droit de revente sur les données images pour des organismes privés (français ou étrangers).

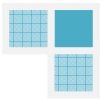
L'utilisation des données LiDAR à des fins commerciales de la part de la société Aerodata France sera sujet à discussion avec la MSHE C.N. Ledoux (évocation d'un partenariat dans le cadre de la génération et de la revente de modèles 3D urbains).

La propriété juridique des ces droits n'est transférée au client qu'après réception de la totalité du paiement par Aerodata France. Avant réception du paiement par le prestataire, le client ne peut pas utiliser ces données à d'autres fins que la procédure d'acceptation des produits.

G.2. Contact

Votre contact pour la réalisation du marché est Mr. Richard VUITTON, spécialisé en photogrammétrie numérique. Il sera le responsable de ce projet. Coordonnées :

Aerodata France
Richard VUITTON
55, boulevard de Strasbourg
F – 59000 LILLE
Tél. : 03 20 20 51 85 / Fax : 03 20 20 51 86
Courriel : r.vuitton@aerodata-france.com



Aerodata France | Copyright 2008 © Tous droits réservés

Annexe C: algorithme utilisé pour classer les points et générer le MNT

Classification (Terra scan©)

Nettoyage et mise à niveau des données

Action: classify points

Routine: by class

From class: any class

To class: 4 - medium vegetation

Classification par écho

Action: classify points

Routine: by echo

From class: 4-medium vegetation

From echo: any last

To class: 1 - Default

Classification du sol

Action: classify points

Routine: ground

From class: 1 - Default

To class: 2 –ground

Max building size: 40 m

Max terrain angle: 88°

Max iteration angle: 6°

Max iteration distance: 2.4 m

Reduce iteration angle when edge length <: 5 m

Elimination des points sous la surface du sol

Action: classify points

Routine: below surface

From class: 2 –ground

To class: 7-low point

Limit: 8*std deviation

Z tolerance: 0.10 m

Génération du MNT (LP 360©)

Export type: Surface

Surface method: Inverse Distance Weighted (IDW)

No data: -999

Power: 2

Cellsize: 0.5 Map units

Fixed radius: 10 Map units

Annexe D: la découverte du sanctuaire des «Cloux du Château»

Clément Duvernoy

Mandeure 1882 et 1883.

Mémoire de la Société des Antiquaires de France, t. 4, p. 42-44

Mémoire de la Société d'Emulation de Montbéliard, 1884, p. 114-116

« Les fouilles exécutées à Mandeure l'an dernier et au commencement de cette année de 1883, ont eu lieu dans les terrains situés entre le théâtre et le Doubs. Cette indication peut suffir aux personnes qui connaissent la localité ; pour celles qui ne la connaissent pas, j'ajouterai quelques mots.

Le théâtre est éloigné du Doubs d'environ un demi-kilomètre. L'intervalle est occupé par des champs entrecoupés de grands amoncellements de pierres que dans le pays on nome murgers, et qui ne sont autre chose que les restes des maisons de la vieille cité entassés pour faire place aux cultures et reproduisant assez habituellement la direction des rues. Il ya deux ans, en labourant peut être un peu plus profondément que de coutume ou plutôt en fouillant le sol comme ne cessent de le faire les habitants de l'endroit, on trouve à 180 mètres du Doubs, une ancienne muraille, longs de 2mètres, que l'on crut un instant avoir fait partie des remparts entourant le castrum et qui, d'après certains documents (charte de Boronus : « Actum Mandouro castro publice »- Chronique de Saint Hermenfroy : « Mandro castro ») remplaça au Moyen Age la cité gallo romaine. Mais e mur en question, de construction évidement antérieure, et parallèle au cours de la rivière, avait précisément une direction opposée à celle qu'eut suivie un mur d'enceinte. Sa longueur était de 18 mètres. A chaque extrémité, il se terminait par un parement, et bientôt on reconnut, qu'il avait du former, à peu près au niveau du sol, une petite plateforme en avant d'un édifice quelconque.

En le dégageant, les ouvriers couvrirent tout à côté, deux cubes de pierre encore en place sur leurs fondations, et ayant servi de soubassement soit aux jambages, soit aux colonnes d'un portique entièrement disparu. L'intervalle d'un cube à l'autre était de 6 mètres et chacun d'eux avait 1,20m d'équarrissage. Le portique était à très peu près, mais non cependant exactement, dans l'axe du théâtre. Ce manque de concordance ne fut reconnu que plus tard, et, pendant un temps, on a pu croire à une certaine relation, tout au moins de symétrie, entre les deux édifices.

A droite et à gauche du portique se détache un mur en forme de croissant, construit avec beaucoup de soin, en petits moellons ciselés et échantillonnés, de 0,07 m de hauteur sur 0,13 m de long. L›épaisseur du mur, à la base, est de 0,80 m, mais il subit successivement deux retraits de 0,07 m à l'intérieur et un à l'extérieur qui le réduisent à 0,59m. Tous les dix mètres il forme un pan, coupé dont le raccordement avec le suivant se fait au moyen d'un pilastre en taille, formant une demi-colonne en saillie à l'extérieur. Les pans sont au nombre de 34, soit 17 de chaque côté. Ils décrivent une ellipse très peu allongée, et se rejoignent en face du théâtre ou se trouvait une porte semblable à celle dont nous venions de découvrir le seuil. Le plus grand axe de l'enceinte, d'une porte à l'autre, est de 116,87m : le diamètre transversal a seulement 110,70m. Le portique qui fait face au théâtre a

complètement disparu, et nous n'en avons eu connaissance que par les récits des habitants qui nous ont dit avoir démoli, il y a quelques années, une plateforme absolument semblable à celle que nous avions dégagée à l'autre extrémité de l'enceinte. Cette plateforme se lie aux murs de clôture par deux ailes de maçonnerie partant de ses deux extrémités, et destinés sans doute à servir de contreforts e portique, tandis que la partie centrale reste séparée du seuil, tout enformant en face de l'entrée une petite saillie de 0,40m ; La distance du théâtre au portique qui lui fait face est de 187m ; l'intervalle, à peu près vide de décombres semble avoir été occupé par une place séparant les deux édifices ; la distance du second portail au Doubs est à peu près le même ; toute l'œuvre de maçonnerie et d'ailleurs exécutée avec un soin extrême et dénote un travail des meilleurs époques de Mandeure.

Mais que contenait cette enceinte, et quelle en était la destination ?était ce simplement une arène destinée à des jeux, à des courses, à des exercices quelconques, ou plutôt un forum, un prétoire, un gymnase ? Nous ne pouvions évidement nous renseigner qu'au moyen de tranchées et de fouilles faites dans l'intérieur, mais il y avait à ce travail de véritables difficultés. C'étaient d'abord trois énormes murgers qui couvraient de leur entassement toute la partie centrale du préau, et qui dénotaient par avance l'existence de constructions considérables ; puis c'étaient les propriétaires qui, s'imaginant tous avoir des trésors cachés dans leur champs, se refusaient obstinément à laisser creuser, ou n'y consentaient qu'au prix de fabuleuses indemnités : ou encore se réservaient ils pour le vendre tout ce qui pourrait être découvert.

Un premier point fut cependant reconnu, c'est qu'il n'y avait pas de gradins appuyés contre le mur d'enceinte, et que rien n'était disposé en vue de spectateurs. Nous en avions la preuve dans le peu d'épaisseur des murs et dans la beauté des paiements dont les petits moellons piqués et jointés avec un soin extrême, étaient évidement destinés à être vus. Des gradins n'auraient pas manqué de laisser quelques traces, les murs n'étaient pas de force à les soutenir, la forme de l'enceinte n'était pas celle d'un cirque, et de plus, en certains points, s'en détachaient de murs, qui pénétrant à l'intérieur, eussent nécessairement interrompu la suite du Doubs, se trouvait un petit réduit de 3 mètres de long sur 0,60m de large, sorte de cuvette dans le fonds, à 0,65m en contre bas du sol actuel, était encore, à gauche de l'entrée, un petit bâtiment composé de deux chambres, dont les murs, appuyés au pourtour sans cependant y être relis, semblaient dater d'une époque postérieure au reste du monument. Chaque pièce avait 6,80m dans les deux sens ; la plus rapprochée du portique était pavée de grandes dalles rectangulaires ; le sol de la seconde à 1m de profondeur, se composait d'un béton en chaux hydraulique et en tuileau pile, épais de0,15m. La maçonnerie était médiocre ; sous le béton se sont rencontrées de nombreuses monnaies gauloises dont la présence nous a confirmé dans l'hypothèse que les deux constructions dataient d'époques différentes : la dernière n'était probablement qu'une loge de portier élevée après coup. L'intérieur de l'enceinte refermait en outre les restes de très anciens murs en pierre sèches de grandes dimensions, et paraissent remonter jusqu'aux temps gaulois. Nous aurons à revenir sur cette époque.

Malgré les difficultés qui nous étaient opposées, nous avions réussi à pénétrer peu à peu dans l'intérieur du préau. A 26 mètres de la porte en face du théâtre existe un large béton de pierres concassées noyées dans le ciment hydraulique, et formant comme l'avant corps le peristille d'un édifice placé en arrière.

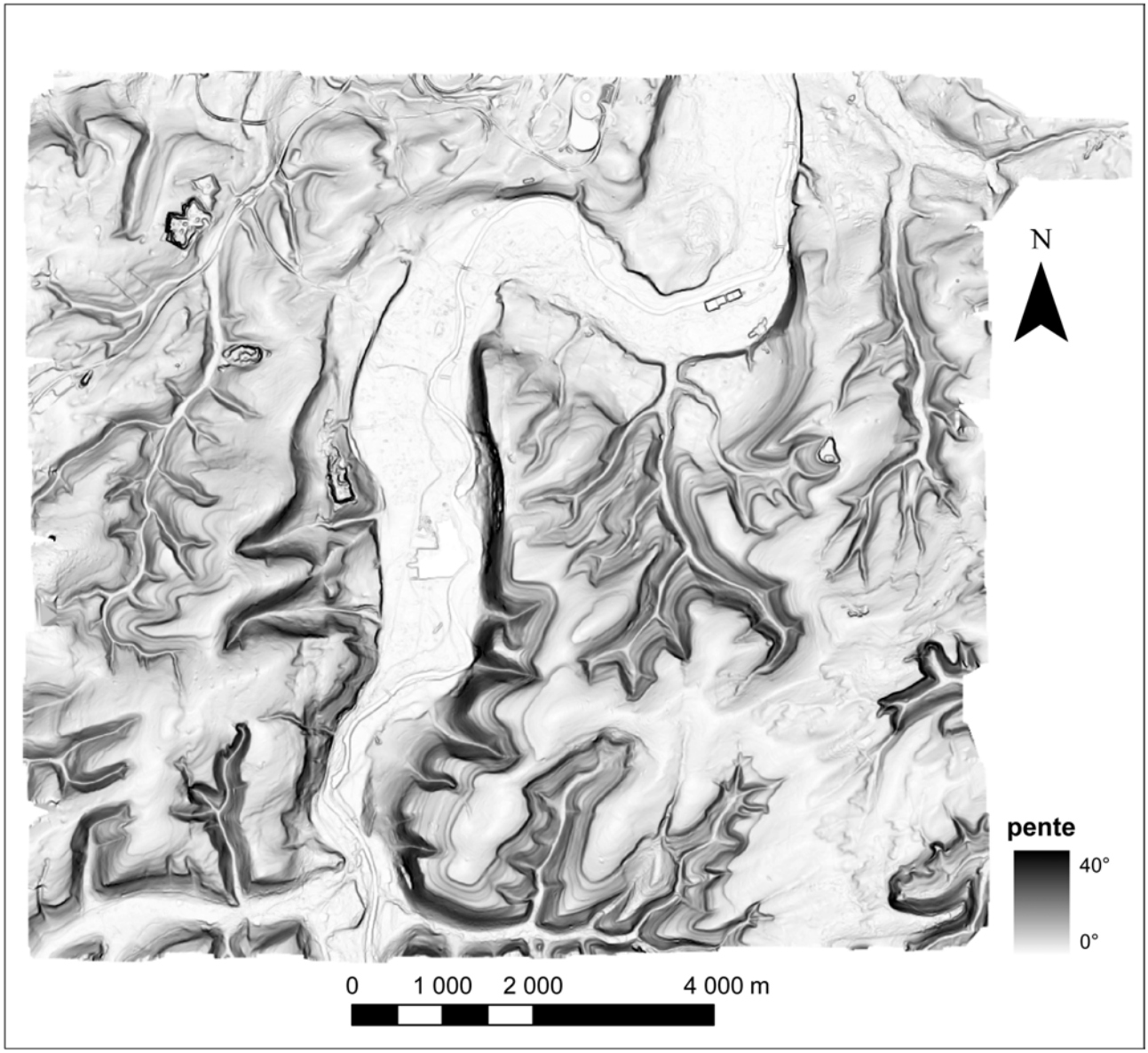
Le revêtement ou pavé qui recouvrait le béton avait disparu ; mais nous avons pu reconnaitre les restes de l'escalier par lequel on y accédait. En arrière de ce perron, les fouilles nous ont fait successivement découvrir quatre murs parallèles, venant s'y appuyer perpendiculairement, et dessinant le tracé d'un édifice considérable dont nous commencions à pouvoir apprécier les dimensions. Le trottoir bétonné a 52 m de long dans le sens faisant face à la porte d'entrée, de 14 m de largeur ; l'épaisseur du massif, en partie démoli varie de 0.80 m à deux mètres. La longueur totale du monument de l'est à l'ouest, y compris les 14 m du perron est de 65,80 m. Sa largeur égale à la longueur du perron est de 52m. Le mur extérieur du coté nord à 1,20m d'épaisseur ; un second mur intérieur parallèle au premier à 3m de distance l'un de l'autre. La nef intérieure est ainsi réduite à 41,60 m Ces quatre murs sont ralliés au couchant par un mur transversal, parallèle au perron, qui ferme le monument de ce coté. Les espaces entre ces différents murs, encore occupés par des massifs de béton sur lequel reposait le pavé, étaient vides, ou du moins nous n'y avons rien trouvé jusqu'à présent.

A 0,50m du mur faisant face au Doubs, existe un petit caveau rectangulaire de 6m de long sur 3m de large et à peu près autant de profondeur. Les premières assises d'une voute ogivale à 4 ans se voyaient encore quelque peu contrebas du sol. Il était vide ; on y pénétrait par une porte ouverte du coté du Doubs ; rien d'ailleurs n'en indiquait la destination. La voute supportait très probablement une petite terrasse en avant de l'issue que l'édifice avait sans dote de ce coté. Il faut encore remarquer que l'axe du monument incliné de quelques mètres vers le nord.

Rien jusqu'à ce moment ne pouvait nous apprendre qu'elle était la destination de ces diverses constructions, non plus que la date de leur fondation et celle de leur ruine. Aucune inscription n'était venue nous éclairer. Toutefois l'ensemble du travail semblait exclure l'idée d'un temple en même temps que se faisait jour celle d'une basilique, avec deux couloirs ou portique latéraux séparés de la nef par des pilastres ou des arcades intérieures ; Cependant en fouillant le préau et en dégageant les murs, nous avions recueilli un certain nombre d'objets, monnaies, pièces d'architecture, dont les indictions pouvaient être utiles.

Il est assez étrange que l'on ne trouve nulle part la mention de ce monument dont l'importance semble avoir été réellement considérable : ni Schickardt, dans son voyage d'Italie, ni Schoapflin, ni Parrot dans le mémorial de ses fouilles ni plus tard M. Boigeol, de Golbery, et Morel-Macler n'en disent mot ; la tradition n'en existait pas davantage dans le village. A t'il été détruit dans les premières invasions germaines de 296 (?) et ses débris ont-ils été déjà employés a la reconstruction du castrum et du village ?... »

Annexe E: carte des pentes



Mots-clés : Antiquité, Protohistoire, Epomanduodurum, paysage, dynamiques naturelles et anthropiques, ressources naturelles, LiDAR, prospection géophysique, photographie aérienne, Système d'Information Géographique

Résumé :

La caractérisation de la réalité matérielle du paysage impose d'une part de reconnaitre avec précision le cadre physique et d'autre part de saisir les interrelations entre les hommes et l'environnement, conditions indispensables à l'appréciation des origines du modelé du paysage.

La compréhension des paysages passés se fonde en partie sur l'analyse de différentes sources documentaires qui permettent ensemble de caractériser bon nombre des évolutions paysagères intervenues notamment depuis l'époque moderne. Toutefois, les aménagements plus anciens ne sont ni localisés ni représentés sur des cartes. Leurs traces sont alors décelées dans le paysage actuel de manière efficace grâce notamment à la mise en œuvre conjointe de diverses méthodes de détection : la photographie aérienne, enregistrant des variations topographiques ou colorimétriques à la surface du sol et le système LiDAR (Light Detection And Ranging), mesurant les variations microtopographiques à l'aide d'un laser.

L'étude d'autres paramètres, imperceptibles à nos sens, permettent également d'appréhender les traces des paysages passés. Les méthodes géophysiques détectent la présence de vestiges ou de structures enfouies qu'aucun indice ne signale en surface grâce à la mesure des propriétés physiques du sol.

Il est largement admis que les méthodes de prospection sont susceptibles de fournir des données archéologiques quant à l'occupation du sol et/ou l'exploitation du territoire. A ce titre, elles ont été appliquées depuis plusieurs années sur le site de l'agglomération antique d'Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs) dans le nord Franche-Comté. Cette ville est considérée, par sa taille, son équipement urbain et sa parure monumentale comme la seconde de Séquanie derrière la capitale de cité Vesontio (Besançon, Doubs).

Ce travail de recherche se propose donc de comparer, à différentes échelles spatiales, l'apport respectif de plusieurs méthodes de prospection à l'étude de dynamiques naturelles et anthropiques dans un espace géographique de 80 km², centré sur la ville antique, associant un tronçon de plaine alluviale du Doubs aux plateaux calcaires environnants. Durant cette étude, il a été possible, entre autre, de développer des outils aidant à la détection des structures archéologiques et géologiques. Les résultats ont aussi permis de redéfinir en partie la topographie de l'agglomération antique.

Keywords: Antiquity, Protohistory, Epomanduodurum, landscape, natural and anthropological dynamics, natural resources, LiDAR, geophysical survey, aerial photography, Geographical Information System.

Abstract:

The characterization of the material reality of the landscape requires to accurately identify the physical geography and to capture the interrelationships between humans and their environment. These conditions are essential to the estimation of the origins of the landscape shaping.

The analysis of documentary sources offers the opportunity to determine the organization of former landscapes and to characterize a large part of their evolutions since the Modern period. However, older land settlements are not localised or symbolised on maps. Their signs are efficiently detected in present landscape through the joint implementation of various detection methods: aerial photography, recording topographic or colorimetric variations on the soil surface, and the LiDAR (Light Detection And Ranging) system, measuring micro-topographic variations using a laser beam.

Other methods can be used to identify the elements conserved in present landscape and reflect their past uses. The measure of physical properties of soils by the geophysical methods can detected the presence of archaeological remains or structures buried while nothing is perceptible to the soil surface.

It is widely supported that survey methods can provide archaeological data of the land use and / or the exploitation of the territory. Thus, they have been applied since several at the site of the ancient city of Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs) in the north of the Franche-Comte. This city is considered by its size, urban equipment and monuments as the second behind de civitas capital of Sequani, Vesontio (Besancon).

This research intends to compare, at different spatial scales, the contribution of several prospecting methods for the study of natural and anthropogenic dynamics in an area of 80 km². The study area is centred on the ancient city and combines a section of the alluvial plain of the Doubs river and the surrounding calcareous plateaus. In this study, it was possible, among other things, to develop tools for the detection of archaeological and geological structures. The results also helped to redefine apart of the topography of the ancient city.