

1 DOSSIER THÉMATIQUE : GESTES RITUELS. DE LA TRACE À L'INTERPRÉTATION

ACTUALITÉ DE LA RECHERCHE

GÉOSCIENCES ET ARCHÉOLOGIE : INTERACTIONS, COMPLÉMENTARITÉS ET PERSPECTIVES

- 114 Bruno GAVAZZI**
Heureuses rencontres. Vers le développement d'approches intégrées en géosciences et archéologie
- 119 Jean-Paul BRAVARD**
Dialogue interdisciplinaire : de l'unité stratigraphique aux interactions culture-environnement
- 129 Ferréol SALOMON**
Les origines d'Ostie : quelles interactions avec la dynamique d'embouchure ? (Delta du Tibre, Italie)
- 141 Quentin BORDERIE, Rowena Y. BANERJEA, Stéphane BONNET, Yannick DEVOS, Cristiano NICOSIA, Christophe PETIT, Ferréol SALOMON, Nathalie SCHNEIDER, Barbora WOUTERS, & Patrice WUSCHER**
Géoarchéologies des contextes urbains : mieux comprendre les modalités de l'artificialisation des géosystèmes
- 158 Patrice WUSCHER, Christophe JORDA, Quentin BORDERIE, Nathalie SCHNEIDER & Laurent BRUXELLES**
De la formation géologique à la tranchée : trouver et comprendre les sites archéologiques menacés par les travaux d'aménagement du territoire
- 176 Morgan MILLET & Michel GUÉLAT**
Les vestiges antiques de Rennaz-Noville (Vaud, Suisse) et leur contexte sédimentaire : nouvelles évidences de l'écroulement du *Tauredunum*
- 188 Théophile PIAU, François BÉTARD, Fabienne DUGAST, Gilles ARNAUD-FASSETTA & Vincent VIEL**
Dynamique géomorphologique holocène et occupation humaine dans le bassin-versant de l'Eure (Bassin de Paris, France) : potentiels d'une approche géoarchéologique multiscalaire et diachronique
- 205 Dominique SCHWARTZ, Vincent ROBIN, Pierre ADAM, Philippe SCHAEFFER, Anne GEBHARDT, Pierre-Alexis HERRAULT, Benjamin KELLER, Daniele DAPIAGGI, Claire STEVENEL, Maxime THISS, Martine TRAUTMANN & Damien ERTLEN**
Les géosciences au service de l'archéologie agraire. Une étude de cas sur les rideaux de culture de Goldbach (68)
- 217 Étienne MANTEL, Stéphane DUBOIS, Jonas PARÉTIAS, Victor VISQUESNEL-SCHLOSSER, Corentin VOISIN, Bruno GAVAZZI & Matthieu RICHARD**
Étudier l'occupation d'une ville : les enjeux du PCR « Topographie générale et insertion territoriale de l'agglomération antique de *Briga* »
- 231 Charlène MOREL**
Un modèle pour comprendre l'influence de l'état de la recherche, des processus post-déposition et de l'attractivité sur la découverte des sites archéologiques dans le Kochersberg (Bas-Rhin, Alsace, Grand-Est, France)
- 241 Lizzie SCHOLTUS**
Spatialisation des découvertes, modélisation du passé. L'informatique au service de l'archéologie
- 254 Guillaume HULIN & François-Xavier SIMON**
Inrap et géophysique : vers une approche raisonnée
- ▶ 260 Hugo REILLER, Matthieu FUCHS, & Bruno GAVAZZI**
Approche multi-méthodes expérimentale pour l'étude d'un site d'occupation romaine et médiévale à Horbourg-Wihr
- 272 François-Xavier SIMON, Julien GUILLEMOTEAU, Guillaume HULIN, Joachim RIMPOT, Julien THIESSON & Alain TABBAGH**
De nouvelles perspectives pour les applications des méthodes électromagnétiques basse fréquence en archéologie
- 283 Rémy WASSONG & Bruno GAVAZZI**
Apport des prospections magnétiques haute résolution à la compréhension d'un habitat protohistorique : l'exemple du site de hauteur fortifié du Maimont
- 294 VARIA**

APPROCHE MULTI-MÉTHODES EXPÉRIMENTALE POUR L'ÉTUDE D'UN SITE D'OCCUPATION ROMAINE ET MÉDIÉVALE À HORBOURG-WIHR

Hugo REILLER^{1,*}, Matthieu FUCHS^{2,3,**}, Bruno GAVAZZI^{1,***}

¹ Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS) ; UMR 7516 ; Université de Strasbourg/EOST, CNRS

² Archéologie Alsace

³ UMR 7044 Archimède ; Université de Strasbourg, CNRS

* h.reiller@unistra.fr

** matthieu.fuchs@archeologie.alsace

*** bgavazzi@unistra.fr

RÉSUMÉ

L'étude présente des campagnes de prospections géophysiques et de sondages archéologiques qui se complètent pour répondre à un double objectif : 1- comprendre l'enchaînement de l'occupation anthropique du territoire entre l'époque romaine et l'époque médiévale d'un secteur archéologique inédit à Horbourg-Wihr (Haut-Rhin, France) ; 2- tester l'efficacité de l'utilisation combinée de méthodes de prospections géophysiques et de la fouille archéologique pour identifier et caractériser les vestiges. L'utilisation de différentes méthodes géophysiques complémentaires se révèle particulièrement adaptée au contexte du site et les résultats ont permis d'implanter des sondages ciblés et de mieux comprendre la distribution spatiale des vestiges identifiés lors de la fouille. Ainsi, cette étude apporte de nouvelles informations sur la succession et superposition de vestiges d'un château médiéval sur la base d'un théâtre gallo-romain.

MOTS-CLÉS

Archéologie, géophysique, magnétisme, résistivité électrique, radar, château médiéval, théâtre gallo-romain.

The study presents geophysical surveys and archaeological excavations that complete each other to fulfil two objectives: 1- to understand the evolution of the human occupation from Roman to Medieval times on an archaeological site in Horbourg-Wihr (Haut-Rhin, France); 2- to test the efficiency of an approach using a combination of different geophysical methods and targeted excavations for the assessment of archaeological remains. The use of different geophysical methods is shown to be particularly adapted to the context of the archaeological site. The results allow to conduct targeted excavations and to better understand the spatial distribution of the identified remains. Thus, the study gives new results on the succession and overlap of the archaeological remains of a medieval castle built on the remnant of a Gallo-Roman theater.

KEYWORDS

Archaeology, geophysics, magnetism, resistivity, georadar, medieval castle, Gallo-Roman theater.

Article accepté après évaluation par deux experts selon le principe du double anonymat

CONTEXTE DU PROJET

Le site d'étude porte sur un terrain d'environ 1,5 ha, à l'ouest du village de Wihr-en-Plaine, sur la commune de Horbourg-Wihr. Aujourd'hui propriété privée, cet espace est constitué de prés et de vergers et d'un étang à l'arrière d'une maison de maître. Les sources d'archives les plus anciennes signalent l'existence d'un château à la fin du XIV^e siècle. Un précis historique rédigé en 1890 par le pasteur Herrenschneider propose de placer le château à cet emplacement sur la base de la toponymie (Schlossgarten – Burggarten), relevée sur des cartes anciennes (**fig. 1**) et des sources historiques **[1]**. Le creusement d'un nouvel étang par le propriétaire en 1993 met au jour une vingtaine de blocs de grès dont certains portant de singulières inscriptions non déchiffrées **[2]** (**fig. 2**). La collecte du mobilier céramique au pied de la berge du nouvel étang par M. Fuchs et l'association

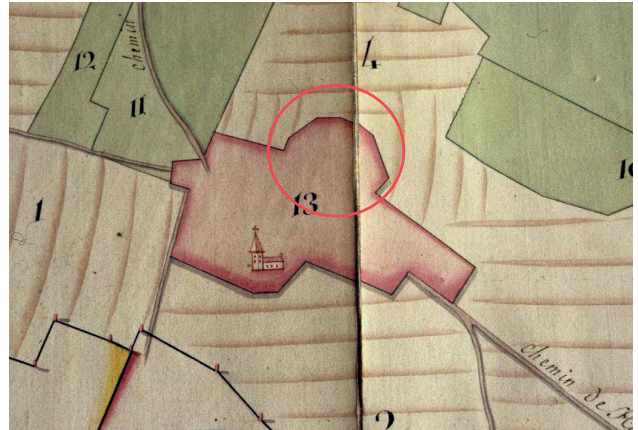


Figure 1 : extrait du plan d'arpentage de la commune de Wihr-en-Plaine (1760), le cercle rouge met en évidence une excroissance en demi-cercle à l'emplacement du site (Archives Départementales du Haut-Rhin, cliché M. Fuchs).

[1] HERRENSCHNEIDER 2016, p. 55-56.

[2] FUCHS 1996, p. 213.

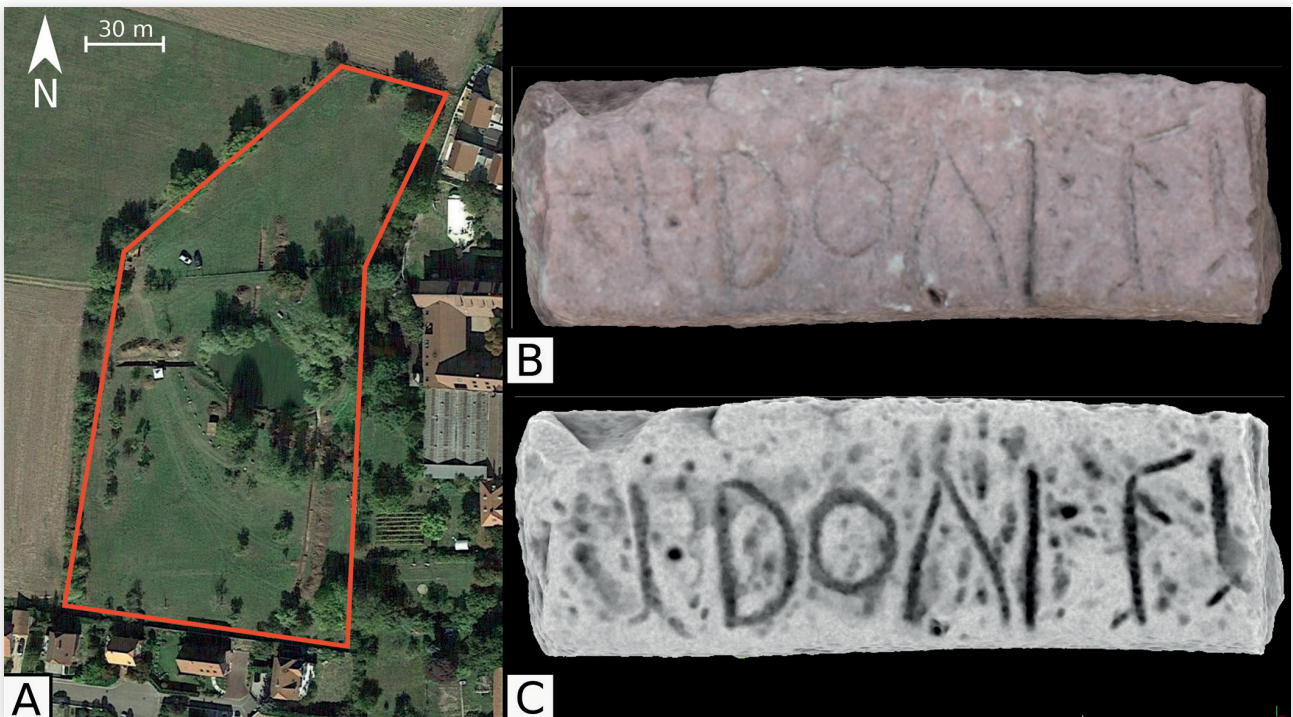


Figure 2

A. Délimitation en rouge du site d'étude sur image satellite Google Earth du 04/10/2018 ;

B. Modélisation 3D (photogrammétrie) du bloc gradin n°6 ;

C. Image du même bloc après un post-traitement PCV (M. Koehl - INSA 2017).

ARCHIHW confirme une phase d'abandon au début de l'époque moderne. Ces investigations menées entre 1994 et 1998 tendent à indiquer la présence d'un château (probablement détruit au XVII^e siècle) réutilisant des blocs plus anciens mais dont la datation remontant à l'Antiquité n'était pas établie [3]. Afin de caractériser les contrastes potentiels de résistivité électrique apparente et d'aimantation liés à la présence des vestiges des fondations du château, différentes prospections géophysiques ont été menées. En premier lieu, des mesures de résistivité électrique apparente ont été conduites en 2009 [4]. Puis, deux campagnes de prospections magnétiques ont été réalisées en 2017 : la première pour mesurer le pseudo-gradient vertical [5] et une seconde pour mesurer l'intensité du champ total [6]. Les prospections électriques ont révélé notamment deux anomalies de résistivité électrique apparente parallèles et formant un arc de cercle. L'anomalie interne de cet arc de cercle est longue d'une centaine de mètres tandis que l'externe est longue d'une trentaine de mètres (fig. 3). L'ensemble a été en premier lieu interprété comme des éléments d'un fossé et d'une enceinte liés au château médiéval. En 2017-2018 les blocs de grès ont fait l'objet d'une modélisation 3D par M. Koehl (INSA-Strasbourg). Sur la base de ces modèles numériques, S. Blin (ENS/CNRS - UMR 8546 AOROC) a proposé en 2018 d'interpréter ces

blocs en tant qu'éléments de gradins gallo-romains. Cette interprétation a conduit M. Fuchs à formuler l'hypothèse que les arcs de cercles observés en prospection correspondent à des éléments d'un édifice de spectacle antique sur lequel un château médiéval aurait été bâti [7]. Cette hypothèse s'accorde avec les données archéologiques, géophysiques et topographiques du lieu ainsi que sa situation en périphérie d'une importante agglomération

[3] Les collectes de mobilier céramique ont été réalisées à intervalles irréguliers au fil des années, au pied de la berge de l'étang, lors des basses eaux de la nappe phréatique et après les périodes de dégel qui érodent régulièrement le dépotoir. Le mobilier ainsi collecté a fait l'objet d'une première étude céramologique en 2017 par Elise Arnold, puis une étude complémentaire et de synthèse par Jérôme Kraft en 2019 (Archéologie Alsace). Ces éléments seront intégrés en 2020 au rapport global des opérations : FUCHS (dir.), à paraître.

[4] Mesures réalisées dans le cadre d'une intervention du Pôle d'Archéologie Interdépartemental Rhénan (PAIR).

[5] Mesures réalisées dans le cadre d'une intervention d'Archéologie Alsace (qui a remplacé le PAIR).

[6] Mesures réalisées dans le cadre d'une intervention de l'UMR 7516 IPGS (CNRS/Unistra).

[7] FUCHS (dir.), à paraître. Cette hypothèse a été présentée au Service Régional de l'Archéologie, et assortie d'une demande d'autorisation de sondage. L'ensemble des données archéologiques et géophysiques collectées depuis 1993 fera l'objet d'un rapport de synthèse, à paraître en 2020, et d'un article, à paraître en 2021.

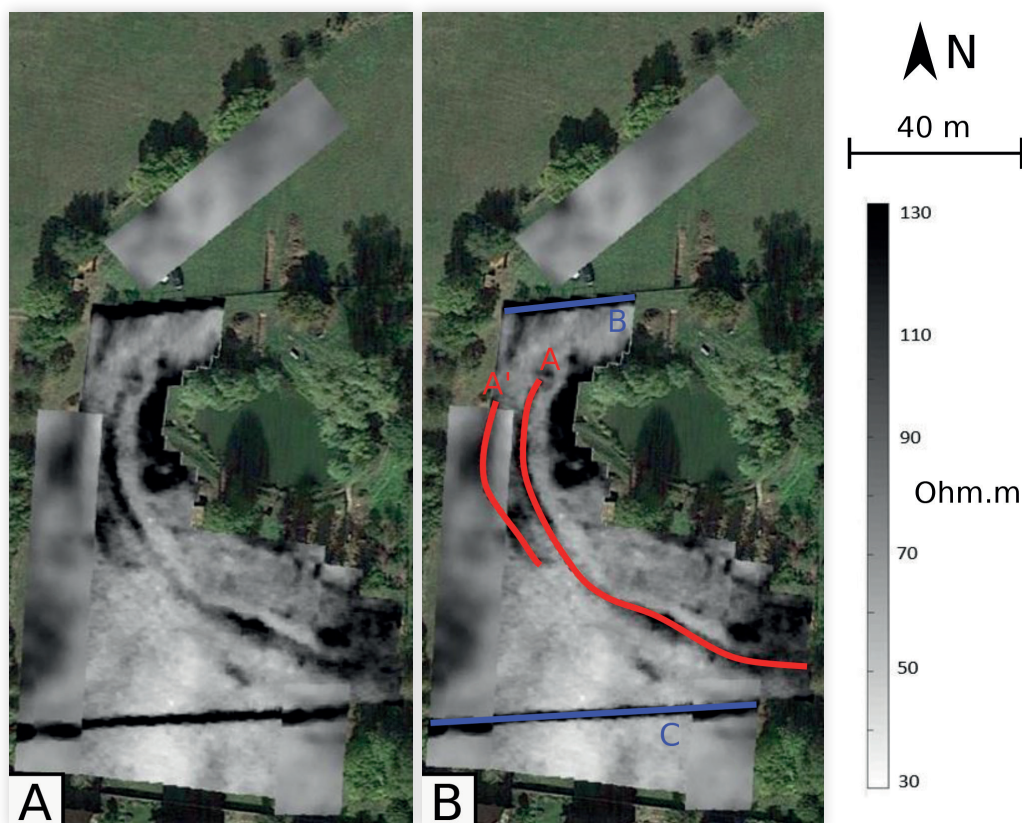


Figure 3

A. combinaison des cartes de la résistivité électrique apparente intégrant 0,5 m de profondeur calculées à partir des données de 2009 et de 2018 à travers différentes méthodes d'interprétation ;

B. même image avec mise en évidence en rouge des anomalies de résistivité apparentes A et A' interprétées comme des éléments en pierre et en bleu les anomalies B et C interprétées comme des structures modernes.

antique (*vicus* de Horbourg). C'est dans ce contexte et afin d'explorer cette hypothèse qu'ont été organisées en septembre-octobre 2018 des prospections géophysiques complémentaires [8] assorties d'une série de tranchées de sondages.

Différentes méthodes géophysiques ont été testées pour évaluer tout d'abord si ces dernières permettent de repérer les vestiges archéologiques suspectés sur ce site. Les techniques utilisées se basent sur les contrastes de différents paramètres physiques que les vestiges peuvent présenter avec leur encaissant : des contrastes d'aimantation pour les méthodes magnétiques, de résistivité électrique apparente pour la méthode électrique et de permittivité diélectrique pour la méthode électromagnétique à haute fréquence (radar). L'étude du site de Kreuzfeld en 2008 et 2012, situé à environ 1 km au sud-ouest, permet de préciser le contexte géologique de la zone : un sol limoneux post-antique repose sur une nappe argileuse de débordement. La campagne de prospection magnétique complétant cette étude archéologique a permis la détection d'habitats antiques, du fait du contraste d'aimantation entre l'encaissant et les matériaux constituant le bâti [9]. Un contexte similaire est alors attendu sur notre site d'étude. Les résultats concluants ont été utilisés pour guider des sondages afin de comprendre la répartition à grande échelle de l'enceinte du château médiéval et du théâtre gallo-romain supposé.

MÉTHODES MISES EN ŒUVRE

Quatre méthodes différentes de prospection géophysique ont donc été mises en œuvre sur le site : la méthode magnétique dans deux configurations (différence de composante verticale et champ total), une méthode électrique et une méthode électromagnétique à haute fréquence (radar). Les méthodes électrique et magnétique ont été utilisées de manière extensive, couvrant toute la zone accessible. En la quasi absence d'informations antérieures aux prospections, il a été jugé pertinent d'utiliser ces techniques de cartographie étendues. Bien que le contexte géologique ne soit pas favorable, la méthode radar a été utilisée en complément à titre expérimental, en réalisant des profils

perpendiculaires aux anomalies dévoilées par les méthodes électrique et magnétique afin de renforcer ou non l'hypothèse de la présence de structures.

MÉTHODES MAGNÉTIQUES

Les mesures magnétiques permettent de quantifier et de cartographier les variations spatiales (anomalies) du champ magnétique liées à des variations d'aimantation dans le sous-sol. Les vestiges de murs ou de fondations composés de blocs de grès ou de calcaire dans un encaissant limono-argileux, comme c'est a priori le cas sur le site d'après l'étude réalisée à Kreuzfeld [10], peuvent être à l'origine d'anomalies mesurables en surface.

Pour la mesure magnétique du champ total, l'appareil de mesure utilisé est un dispositif mis au point par l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS) et utilisant des magnétomètres trois composantes [11]. Ce type de dispositif permet la mesure multi-capteurs et de compenser les effets de l'équipement avec un niveau de précision final similaire à celui de magnétomètres scalaires [12]. Dans l'objectif d'affiner la carte de l'anomalie de l'intensité du champ total réalisée en 2017, des mesures complémentaires de plus haute résolution ont été réalisées en septembre 2018 : l'écartement entre les capteurs et la hauteur des mesures sont réduits (de 0,5 m à 0,11 m pour l'écartement inter-capteurs et de 0,8 m à 0,3 m pour la hauteur des mesures). L'appareil est muni de 5 magnétomètres ainsi que d'un dispositif GNSS différentiel permettant un géoréférencement des données avec une précision d'environ 0,05 m.

La mesure de la différence de la composante verticale du champ magnétique terrestre (pseudo-gradient vertical) a été réalisée avec l'appareil MXPDA de *Sensys* dans le cadre des mesures de 2017. Le système est muni de 5 gradiomètres fluxgate espacés de 0,5 m, chaque gradiomètre comprenant une sonde verticale à chaque extrémité qui permet l'enregistrement direct de la différence de l'intensité de la composante verticale du champ magnétique sur ces 0,65 m.

MÉTHODE ÉLECTRIQUE

La méthode électrique permet de mesurer les variations spatiales de résistivité électrique

[8] Pour plus de détails sur l'aspect complémentaire des différentes méthodes géophysiques, voir par exemple WATTERS 2009.

[9] SIMON 2012.

[10] *Ibid.*

[11] GAVAZZI *et al.* 2016.

[12] GAVAZZI *et al.* 2019.

apparente. D'après le contexte géo-archéologique décrit en début d'article, on s'attend à des vestiges de fondations ou de murs constitués de blocs de grès ou de calcaire qui donc, peuvent présenter des contrastes de résistivité électrique par rapport à l'encaissant limono-argileux. La résistivité apparente a été mesurée avec l'appareil RM85 développé par *Geoscan*. Il est muni de 4 électrodes mobiles espacées de 0,5 m et reliées à deux autres électrodes fixes (situées à une distance suffisamment éloignée des mobiles pour être considérées à une distance infinie). Cette installation permet une mesure en mode pôle-pôle, adaptée au contexte archéologique [13]. Ce dispositif permet de réaliser trois cartes des contrastes de résistivité apparente à trois profondeurs (0,5 m, 1 m et 1,5 m) en fonction de l'écartement inter-électrodes. L'appareil est déplacé tous les mètres et six mesures sont faites à chaque fois : trois mesures pour la carte de résistivité apparente intégrant 0,5 m de profondeur, deux pour celle intégrant 1 m de profondeur et une pour celle intégrant 1,5 m de profondeur. L'acquisition a été réalisée en deux temps : une première campagne en 2009, puis des mesures complémentaires en 2018. Le protocole d'acquisition des données est le même d'une prospection à l'autre. En revanche, les paramètres d'interpolation peuvent différer entre les données de 2009 et celles de 2018. En effet, pour les données de 2009 seules les cartes finales ont été utilisées dans le cadre de l'étude, sans connaître les paramètres exacts de l'interpolation, autres que le fait que le traitement des données a été fait à l'aide de *WuMapPy* [14]. Pour les données de 2018, l'interpolation a été réalisée à l'aide de l'extension *Archaeological Geophysics Toolbox* (AGT) pour QGIS [15]. Une moyenne mobile prenant en compte les données dans un cercle de 1,5m de rayon est calculée à chaque point de mesure. À chaque moyenne mobile de résistivité apparente calculée, une teinte de couleur est associée pour remplir le cercle.

MÉTHODE RADAR

Le principe de la méthode est l'émission d'une onde électromagnétique à une haute fréquence, c'est-à-dire une onde radar. L'onde se réfléchit au niveau d'interfaces où des contrastes de permittivité diélectrique sont présents, ce qui peut être le cas lorsqu'une fondation ou un mur est présent à faible profondeur (quelques dizaines de centimètres au plus) au milieu d'un encaissant limono-argileux. En effet, les ondes radar sont atténuées trop rapidement dans ce genre de contexte

pour espérer pénétrer plus profondément. Les mesures radar ont été réalisées en 2018 en suivant 8 profils avec l'antenne 250 MHz X3M développée par *Mala*. Plusieurs traitements sont effectués sur les données brutes : décalage du premier train de réflecteur, filtre passe-haut, amplification du signal en le multipliant par l'inverse de son enveloppe, filtre passe bande (180MHz - 260 MHz), filtrage des réflecteurs plats et égalisateur d'énergie.

SONDAGES

Des tranchées de sondage ont été réalisées au mois d'octobre 2018 ; trois sondages selon un principe de recoupement perpendiculaire de l'anomalie curviligne la plus étendue, au sud, à l'ouest et au nord, ainsi que huit sondages complémentaires plus limités. Des profils radars ont été réalisés selon le même principe de recoupement, avant la réalisation des tranchées. Les tranchées de sondage ont été réalisées à la pelle mécanique équipée d'un godet de curage, jusqu'à atteindre le substrat [16].

RÉSULTATS

MÉTHODE ÉLECTRIQUE

La carte de résistivité apparente intégrant une profondeur de 0,5 m (**fig. 3**) révèle une anomalie allongée formant un arc de cercle long d'une centaine de mètre (anomalie A). Ce contraste varie entre 10 et 90 ohm.m avec l'encaissant. Dans la partie ouest, sur un peu moins de la moitié de la longueur, une deuxième anomalie (anomalie A') similaire et parallèle apparaît (**fig. 3**). L'intensité et la forme de ces anomalies suggèrent la présence de structures en pierre potentiellement maçonnées dans l'encaissant limono-argileux. La variation de l'intensité de ces anomalies alors que l'encaissant est a priori le même pourrait s'expliquer par une différence d'état de conservation ou de démantèlement des structures, les parties avec le plus fort contraste correspondant aux parties les mieux conservées. Au vu du contexte archéologique, il pourrait s'agir aussi bien d'éléments du théâtre gallo-romain que du château médiéval.

[13] MARTINAUD 1990.

[14] Pour plus de détails sur le logiciel voir MARTY *et al.* 2015.

[15] Pour plus de détails sur l'extension, voir HULIN, SIMON & HATAMI 2017.

[16] FUCHS (dir.), à paraître.

Deux anomalies (> 130 ohm.m), rectilignes orientées est-ouest, présumées de la présence de structures anthropiques au nord et au sud de la carte de résistivité apparente (**fig. 3**). Un chemin couramment emprunté par des véhicules, où le sol est tassé, est responsable du contraste de résistivité apparente au nord (anomalie B). La comparaison de la carte de résistivité électrique avec le cadastre des années 1950 démontre que le contraste au sud est dû à la présence d'une allée aujourd'hui disparue (anomalie C).

Les différences de signal pour les mêmes anomalies entre les résultats de 2009 et 2018, notamment pour l'anomalie C, peuvent s'expliquer par deux facteurs. Le décalage spatial s'explique par les imprécisions du positionnement (positionnement relatif sur profil, puis 4 coins géoréférencés au GNSS différentiel), tandis que les variations d'intensité et d'étalement peuvent s'expliquer par des variations de flux hydriques entre les deux périodes d'acquisition. Les cartes de la résistivité apparente intégrant 1 m et 1,5 m ne sont pas montrées ici car les anomalies A et A' y sont visibles mais de façon moins résolutive que sur la carte intégrant 0,5 m, contrairement à l'anomalie C qui disparaît. Ce qui

permet simplement de dire que les anomalies A et A' correspondent à des structures qui ne sont pas superficielles et à faible enfouissement.

MÉTHODES MAGNÉTIQUES

Les cartes de l'anomalie de l'intensité du champ magnétique total à haute résolution (**fig. 4**) et de la différence de la composante verticale (pseudo gradient) du champ magnétique (**fig. 5**) révèlent une anomalie allongée formant un arc de cercle long d'une trentaine de mètres. Ce contraste d'aimantation génère une anomalie d'une amplitude d'environ 40 nT [17] sur la carte du champ total et d'au maximum 15 nT sur la carte du pseudo-gradient. L'analyse de cette anomalie est similaire à celle faite pour les anomalies de résistivité électrique : l'intensité ainsi que la forme suggèrent la présence d'élément du théâtre romain ou du château médiéval. Cependant, même si les deux anomalies sont superposées, elles ne sont pas de la même longueur : le contraste d'aimantation est moins étendu que le contraste de résistivité électrique, ce qui suggère des sources différentes entre l'anomalie de résistivité électrique et l'anomalie magnétique. Quelques anomalies ponctuelles de fortes amplitudes sont présentes sur les cartes de l'anomalie de l'intensité du champ total et du pseudo gradient magnétique vertical (**fig. 5**). Elles sont probablement dues à des éléments métalliques d'époque contemporaine.

[17] L'unité utilisée pour la mesure de l'intensité du champ magnétique est le nano Tesla, noté nT. Pour la mesure du pseudo-gradient, l'unité est toujours le nT, bien qu'il s'agisse alors d'une différence d'intensité.

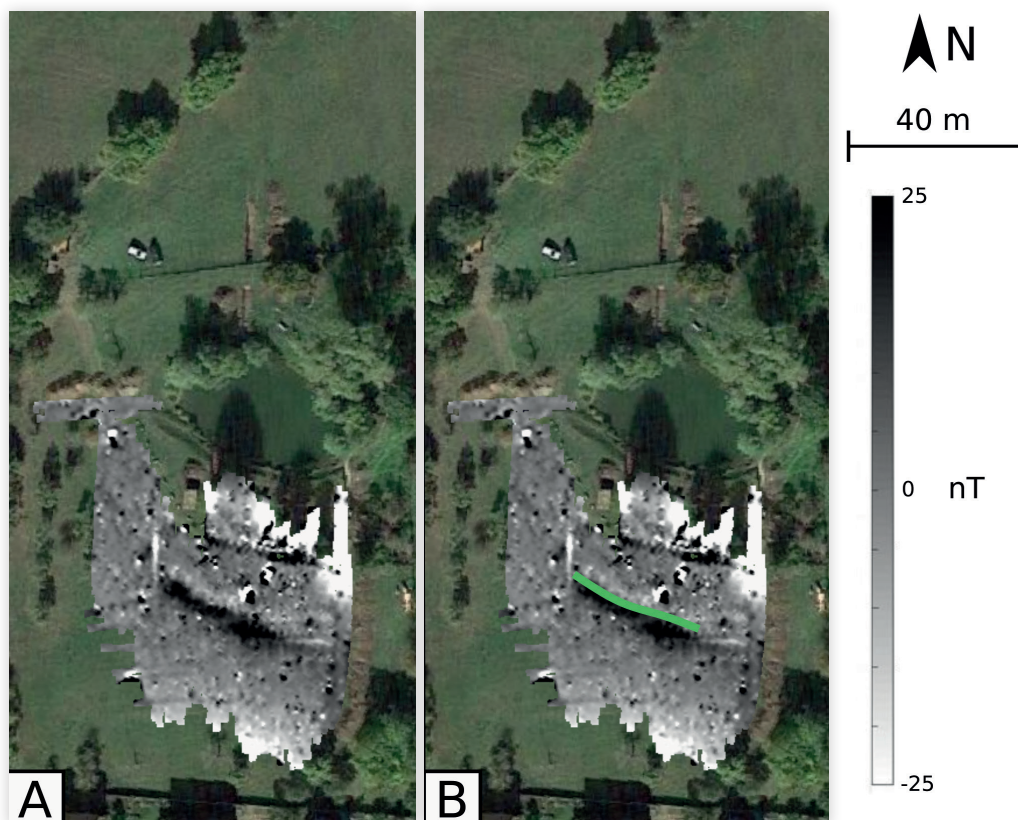


Figure 4
A. Carte de l'anomalie de l'intensité du champ magnétique acquise en 2018 ;
B. même image avec mise en évidence en vert de l'anomalie interprétée comme témoin d'une structure archéologique.

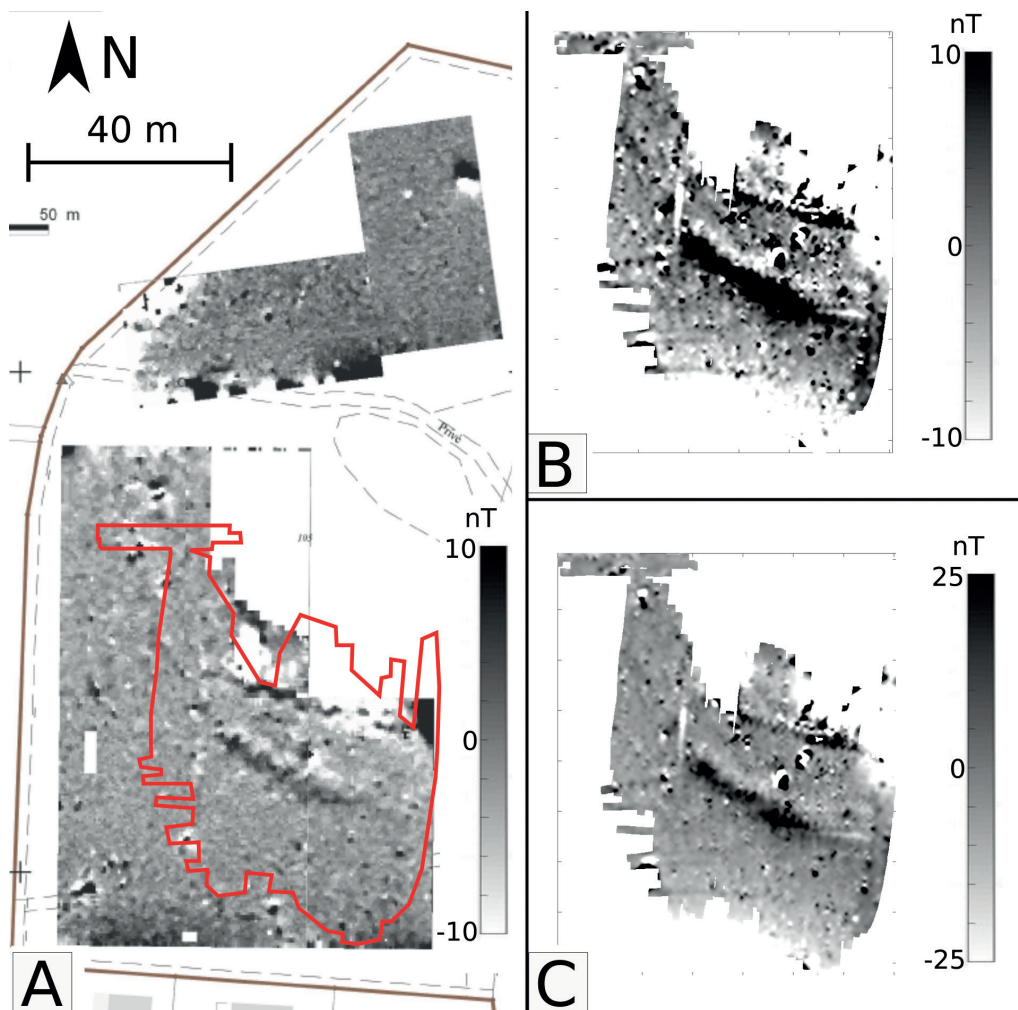


Figure 5

A. Carte du pseudo-gradient vertical du champ magnétique, échelle de couleur de -10 à 10 nT, le trait rouge délimite la zone présentée en B et C, modifié d'après un document interne d'Archéologie Alsace (Florian Basoge, 2017) ;

B. Carte de l'anomalie de l'intensité magnétique mesurée en 2018, échelle de couleur de -10 à 10 nT ;

C. Carte de l'anomalie de l'intensité magnétique mesurée en 2018, échelle de couleur de -25 à 25 nT.

MÉTHODE RADAR

Les résultats du profil n°1 (**fig. 6**) montrent un premier groupe de réflecteurs subhorizontaux et continu aux environs du quinzième mètre. C'est l'endroit où l'anomalie électrique A recoupe le profil 1. Une forte concentration de réflecteurs discontinus

est constatée sur les quinze derniers mètres du profil. La profondeur maximale de pénétration de l'onde radar (**fig. 6**) est de 0,6 m sur le profil n°1. Elle est calculée en prenant en compte une vitesse de propagation de l'onde de 0,03 m/ns, trouvée avec la méthode de modélisation d'hyperboles.

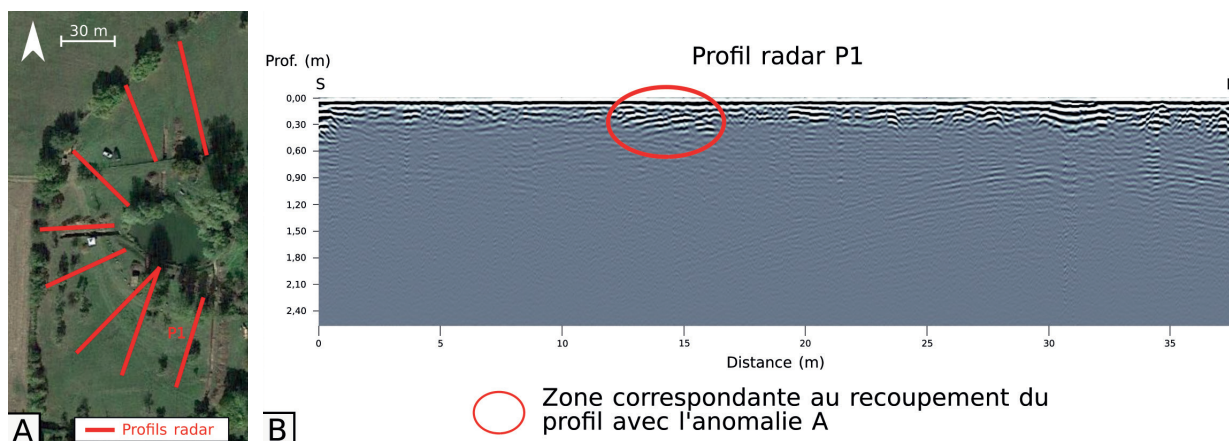


Figure 6

A. Positionnement des profils radar sur fond d'image satellite Google Earth (2018) et indication du profil P1 ;

B. Profil radar P1 et positionnement de la zone qui correspond au recoupement du profil avec l'anomalie A identifiée lors de la prospection électrique.

Les 7 autres profils présentent la même profondeur d'investigation. Sur tous les profils, si l'on peut noter des groupes de réflecteurs au niveau des recoupements avec les anomalies identifiées par les autres méthodes, on remarque également d'autres groupes de réflecteurs qui correspondent vraisemblablement à des hétérogénéités non archéologiques de très proche surface. Au vu de cette observation et de la faible profondeur de pénétration, il a été décidé par la suite d'utiliser le radar seulement pour vérifier si un groupe de réflecteur est présent au niveau des anomalies identifiées à l'aide des autres méthodes.

LES TRANCHÉES DE SONDAGE

On ne s'intéressera ici qu'aux sondages 1, 2 et 11 car ils permettent de comprendre le lien entre les signaux géophysiques de surface et les structures archéologiques présentes dans le sous-sol (**fig. 7**). Le sondage 1 a été réalisé perpendiculairement aux anomalies A et C. Le sondage 2 a été réalisé perpendiculairement aux anomalies A et A'. Le sondage 11 a été réalisé en ciblant une anomalie magnétique d'intensité particulièrement forte. Pour les profils 1 et 2, un profil radar suivant la même implantation a été mesuré en amont de la fouille.

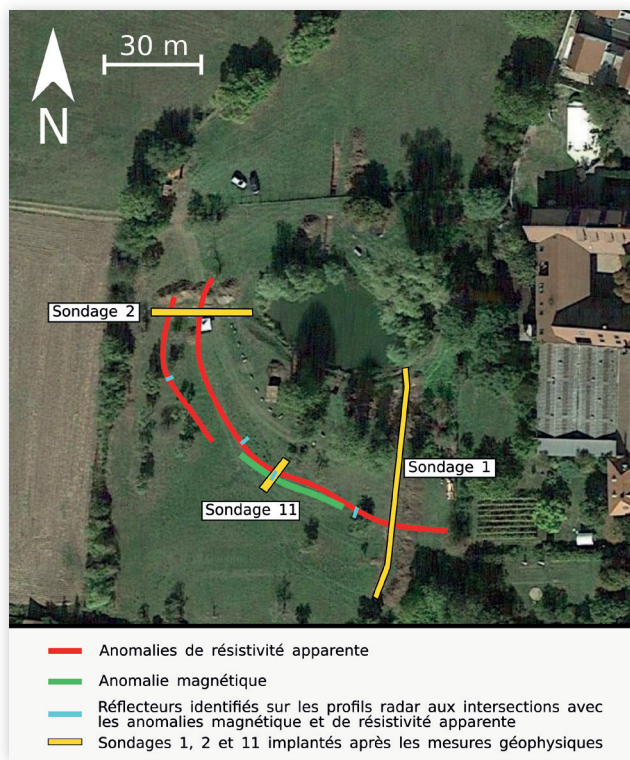


Figure 7

Carte d'implantation des sondages 1, 2 et 11 par rapport aux interprétations géophysiques. Fond de carte satellite issu de Google Earth (cliché 2018).

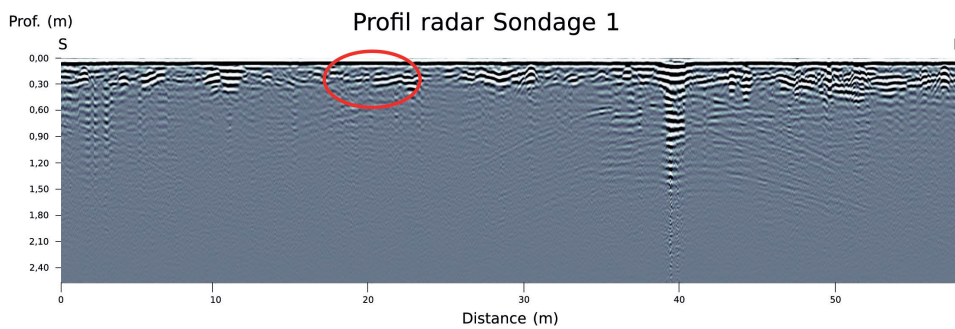
Le sondage 1 (**fig. 8**) met en évidence au niveau de l'anomalie A des indices très ténus d'une fondation pillée et bordée par un fossé comblé par les matériaux de la fondation (moellons calcaires). On note également un groupe de réflecteurs associés sur le profil radar correspondant.


Le sondage 2 (**fig. 9**) met en évidence les restes d'une fondation pillée mais présentant encore une forte concentration de moellons à l'emplacement de l'anomalie curviligne A. Ce sondage montre également que l'anomalie électrique A' correspond au rejet du gravier issu du creusement du fossé, épousant ainsi également une forme curviligne et parallèle à la structure. Un groupe de réflecteurs est également présent à cet endroit sur le profil radar.

Enfin, le sondage 11 (**fig. 10**) met en évidence, en sus des restes de fondation au niveau de l'anomalie A, une concentration importante de tuiles et de briques en terre cuite dans le remplissage du fossé au niveau de l'anomalie magnétique. Un groupe de réflecteurs est présent à cet endroit sur le profil radar.

Au final, ces trois sondages permettent d'interpréter l'anomalie A comme l'association des restes d'une fondation d'une structure bâtie et d'un fossé associé aujourd'hui comblé. Le contraste de résistivité provenant probablement du contraste entre les blocs de la fondation et du comblement du fossé avec l'encaissant. De façon similaire, l'anomalie A' témoigne du contraste entre des déblais de creusement du fossé et l'encaissant. L'anomalie magnétique quant à elle traduit une zone où le comblement du fossé montre une forte concentration en éléments en terre cuite. Les réflecteurs observés au radar correspondent probablement également aux blocs lorsque l'enfouissement est inférieur à 0,6 m.

On peut alors interpréter les résultats géophysiques et des sondages de la façon suivante : la fondation est interprétée comme les vestiges du mur de soutènement du talus du théâtre, réutilisé en qualité de rempart du château médiéval et auquel a été ajouté un fossé comme un élément défensif complémentaire. Lors de la démolition du château, le fossé se retrouve partiellement comblé dont une partie par des matériaux de construction en terre cuite (tuiles et briques) qui se caractérisent par un contraste d'aimantation important avec l'encaissant. Les matériaux en pierre de calcaire et de grès ont ensuite fait l'objet eux-mêmes de récupération, ne laissant que la marque de fondations « fantômes » avec quelques débris. Ce phénomène de recyclage de matériaux est fréquent en plaine d'Alsace, où la pierre est rare et doit être importée de carrières relativement éloignées.



A  Zone correspondante au recoupement du profil radar avec l'anomalie A

B Berme Ouest du sondage 1 au niveau de l'anomalie A




B  Fossé  Fondations

Figure 8

A. Profil radar mesuré au niveau du sondage 1 avant la fouille et positionnement du recoupement avec l'anomalie A ;

B. Photographie (H. Reiller, 2018) et interprétations de la berme Ouest du sondage 1 au niveau de l'intersection avec l'anomalie A.

DISCUSSIONS

Les campagnes de prospections électrique, magnétique et radar apportent des informations relatives aux contrastes du sous-sol qui permettent de comprendre la disposition de l'enceinte du château médiéval qui se surimpose sur la fondation antique. Cependant, aucun vestige de théâtre antique se distinguant de la reprise médiévale n'est spécifiquement imagé avec les méthodes géophysiques. Par ailleurs, aucun nouveau bloc d'architecture en grès qui indiquerait la présence de gradins n'a été retrouvé dans les sondages. Selon l'hypothèse de la présence d'un théâtre antique initial, on peut restituer le principe suivant : une *orchestra* bordée de gradins en pierre, sur un ou deux rangs, puis un talus en terre (*cavea*), supportant des bancs-gradins en bois, le talus étant lui-même ceinturé d'un mur de soutènement. Cette hypothèse est confortée par le fait que les blocs gradins ont été exclusivement mis au jour lors des travaux de creusement de l'étang en 1993 dans la zone centrale, formant un

demi-cercle. Dès lors, le talus de la *cavea* ayant été arasé, cet emplacement ne livre pas d'indice particulier. Dans une telle configuration, les prospections et sondages qui ont eu lieu au niveau de la butte, elle-même construite avec l'encaissant, ne présentent pas de contraste de résistivité électrique ou d'aimantation avec d'indices suffisants pour être mesurables.

Les matériaux constituant la fondation médiévale se manifestent par un contraste de résistivité apparente avec l'encaissant alors qu'ils n'entraînent aucune anomalie magnétique mesurable avec les techniques employées. Le contraste d'aimantation entre les pierres de calcaire et de grès et l'encaissant semble trop faible pour induire une perturbation du champ magnétique mesurable. Dans l'optique d'un élargissement de la zone de prospection avec pour objectif la détection du château, il est alors plutôt recommandé d'utiliser la méthode électrique.

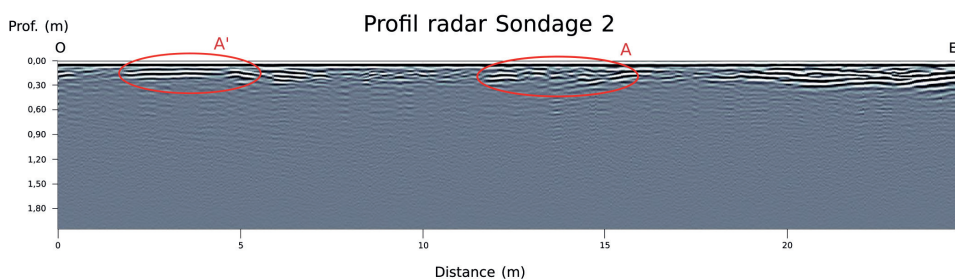
Au niveau des sondages effectués, les vestiges du château médiéval commencent à apparaître dans les 50 premiers centimètres de profondeur, ce qui en fait


des structures peu profondes a priori faciles à détecter. Cependant, l'encaissant de nature limono-argileuse complique, comme attendu, l'utilisation de la méthode radar. En effet, ce type de terrain généralement caractérisé comme conducteur, n'autorise ici une profondeur de pénétration des ondes radar hautes fréquences que de 0,4 m au maximum ; sa mise en œuvre permet néanmoins de repérer des vestiges lorsque les pierres constituant l'aplomb de la fondation sont situées dans les premiers centimètres. Les trois sondages montrent effectivement une cohérence des signaux radar avec la présence des vestiges de l'enceinte du château médiéval. Il paraît, malgré tout, peu pertinent d'étendre la prospection radar. En effet, étant donné l'état de conservation de la structure à imager, il est possible que la profondeur de son aplomb varie de plusieurs dizaines de centimètres sur le site d'étude. Par ailleurs, seuls 4 groupes de réflecteurs correspondant aux vestiges ont été relevés sur les 8 profils réalisés. De plus, la fin des profils est souvent caractérisée par une forte concentration de réflecteurs ponctuels et discontinus, empêchant toute analyse de vestiges de bâti.

L'absence d'homogénéité de la répartition des tuiles et briques en terre cuite dans le fossé peut être interprétée comme résultant des aléas des démolitions des superstructures des bâtiments du château.

Les deux cartes magnétiques permettent de réaliser la même interprétation : l'anomalie A est visible, sur une longueur de 30 mètres, que ce soit sur la carte du champ magnétique total ou du gradient magnétique vertical. En revanche, l'amplitude de l'anomalie sur la carte du champ total est d'environ 40 nT alors que sur la carte du gradient vertical elle n'est que d'environ 15 nT. Cette différence vient des méthodes de mesure. Ici la mesure de l'intensité du champ total semble être plus appropriée au contexte puisqu'elle permet de repérer des contrastes d'aimantations plus faibles ou des éléments à plus grande profondeur que la mesure du pseudo-gradient vertical.

Les prospections électrique et radar n'ont donné aucun résultat en termes d'interprétation archéologique au nord du site d'étude. La carte électrique à cet endroit n'est pas complète, mais il est envisageable d'étendre la prospection. La mesure électrique multi profondeur n'a pas donné de résultats



A  Zones correspondantes aux recoupements du profil radar avec les anomalies A et A'

Photographie du sondage 2 au niveau du recoupement avec l'anomalie A

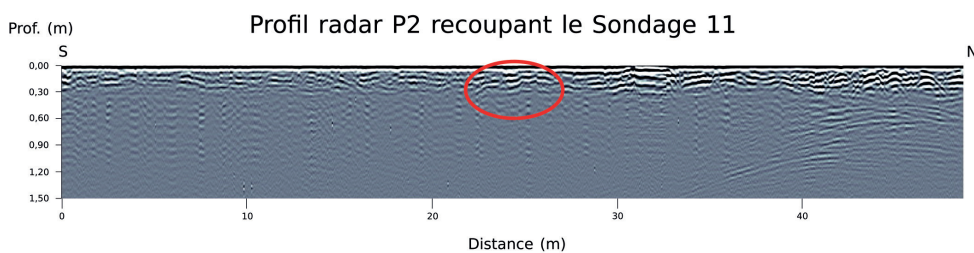


B  Fondations Fossé

Figure 9

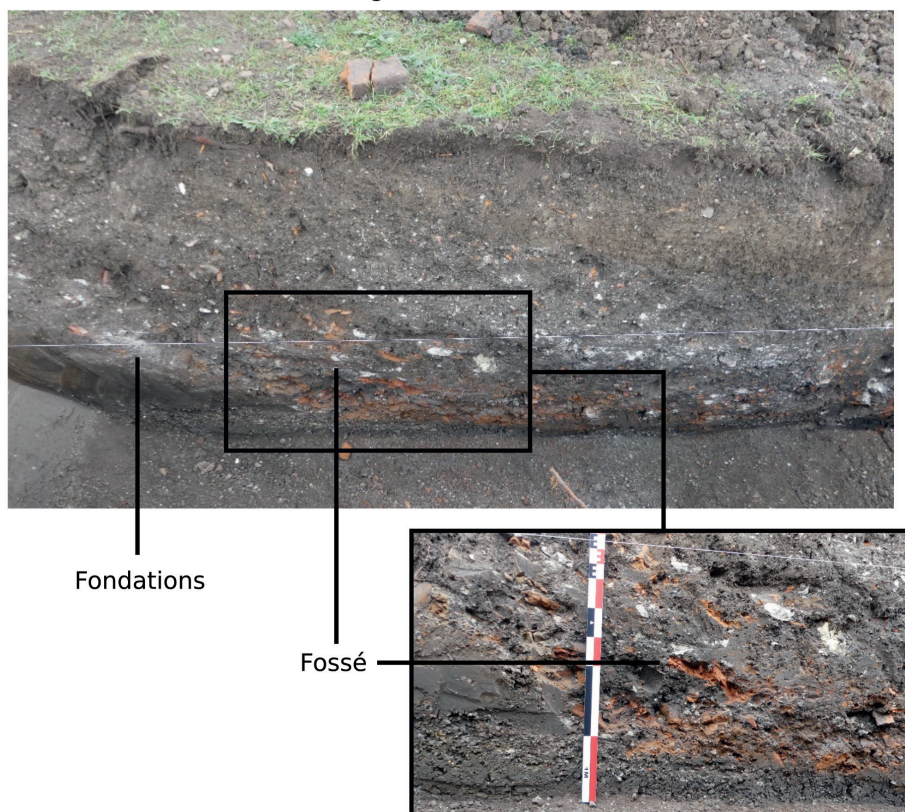
A. Profil radar mesuré au niveau du sondage 2 avant la fouille et positionnement du recoupement avec les anomalies A et A' ;

B. Photographie du sondage 2 au niveau du recoupement avec l'anomalie A (H. Reiller, 2018) et interprétations.



A  Zone correspondant au recouplement du profil radar avec l'anomalie A et l'anomalie magnétique

Berme Est du sondage 11 au niveau de l'anomalie A



B

Figure 10

A. Profil radar P2 recoupant le sondage 11 avant la fouille et positionnement du recouplement avec l'anomalie A et l'anomalie magnétique ;

B. Photographie du sondage 11 au niveau du recouplement avec l'anomalie A et l'anomalie magnétique (H. Reiller, 2018) et interprétations.

particuliers pour les structures étudiées : les résistivités apparentes à 1 m et 1,5 m intègrent des volumes trop importants pour être pertinents. En revanche, les trois profils radars réalisés n'ont montré aucun réflecteur dans cette zone, ce qui peut s'expliquer soit par l'absence de structures dans un état similaire à la partie sud, soit par une plus grande profondeur d'enfouissement. Il pourrait également être envisagé de réaliser une prospection magnétique dans la zone nord ; à savoir des mesures de champ total dans les mêmes conditions que la prospection au sud (capteurs resserrés à quelques centimètres du sol). Il serait aussi intéressant de réaliser quelques profils de tomographie de résistivité électrique afin de mieux comprendre la répartition en profondeur des structures identifiées et des différents niveaux constituant l'encaissant.

CONCLUSIONS

Cette approche expérimentale a permis de mettre en œuvre plusieurs méthodes de prospection géophysique assorties de vérifications archéologiques de terrain par la réalisation des tranchées de sondages. Si la méthode électrique est celle qui a livré le plus d'indices de structures anthropiques, la méthode magnétique a livré des indices complémentaires. Les deux méthodes permettent de caractériser des contrastes d'éléments de démolitions différents, apportant alors des résultats complémentaires pour l'interprétation. Les perturbations liées à la récupération de matériaux à plusieurs époques sur le site n'ont pas été propices à des signatures précises et aisément interprétables, l'état de conservation étant très mauvais.

Du point de vue de l'archéologie, ces investigations ont permis d'étayer l'hypothèse d'une succession d'un édifice de spectacle antique puis d'un château médiéval, sans toutefois apporter de preuves irréfutables mais plutôt un raisonnable faisceau d'indices. Il ne reste quasiment rien du théâtre, ses matériaux ayant été récupérés et la zone centrale ayant été détruite en 1993 par le creusement du nouvel étang. Le château semble avoir été implanté directement sur le talus du théâtre, mais il a lui-même été détruit et a fait l'objet de récupération de matériaux. Hormis

la présence d'un dépotoir de la fin du XVI^e - début du XVII^e siècle, très peu de mobilier archéologique a été découvert, rendant la datation de ces phases chronologiques très peu aisée. Ce site, aujourd'hui non menacé, présente l'intérêt d'être préservé et aisément accessible. Il est envisageable d'y tester de nouvelles méthodes ou protocoles et d'en faire la vérification à l'aide de sondages. Toutefois, pour une bonne compréhension archéologique et spatiale, il serait nécessaire de procéder à un décapage extensif dans un cadre d'archéologie programmée. ■

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier François-Xavier Simon et Florian Basoge (Archéologie Alsace) qui ont conduit respectivement les mesures électriques en 2009 et les mesures du gradient magnétique en 2017. Ils remercient M. Mathieu Koehl (INSA Strasbourg) pour la photogrammétrie et la modélisation de l'ensemble des blocs. Ils remercient également Séverine Blin (ENS/CNRS - UMR 8546 AOROC), pour son regard d'expert en architecture antique, qui a permis d'avancer, en mars 2018, l'hypothèse d'interprétation des blocs de grès comme des gradins provenant d'un édifice de spectacle. Leur reconnaissance va à l'équipe de bénévoles de l'association ARCHIHW, qui œuvrent depuis longtemps sur ce site (prospections, sondages, moulages, débroussaillage) et ont prêté leurs concours aux levés géophysiques. Ils remercient également chaleureusement les propriétaires, MM. Thomas et Nicolas Hirth et Olivier Nicolas pour la bienveillance constante dont ils ont fait preuve depuis 1993 pour autoriser les différentes recherches, archéologiques et géophysiques. Enfin, les auteurs tiennent à remercier les deux évaluateurs anonymes pour leurs commentaires et suggestions qui ont permis d'améliorer la qualité de l'article.

BIBLIOGRAPHIE

- FUCHS, Matthieu, 1996**, « Catalogue des collections lapidaires », dans Matthieu Fuchs (dir.), *Horbourg-Wihr. À la lumière de l'archéologie. Histoire et nouveauté. Mélanges offerts à Charles Bonnet*, Actes 2 d'Archihw, Horbourg-Wihr, 1996, p. 155-214.
- FUCHS, Matthieu (dir.), à paraître**, *Rapport de sondages archéologiques 2018*, Arrêté Préfectoral SRA Grand Est n°2018/A 313 portant autorisation de sondage archéologique - opération n° 017132.
- GAVAZZI, Bruno, LE MAIRE, Pauline, MUNSCY, Marc & DECHAMP, Aline, 2016**, « Fluxgate vector magnetometers: A multisensor device for ground, UAV, and airborne magnetic surveys », *The Leading Edge* 35/9, p. 795-797, DOI: <https://dx.doi.org/10.1190/tle35090795.1>.
- GAVAZZI, Bruno, LE MAIRE, Pauline, MERCIER DE LÉPINAY, Jeanne, CALOU, Paul & MUNSCY, Marc, 2019**, « Fluxgate three-component magnetometers for cost-effective ground, UAV and airborne magnetic surveys for industrial and academic geoscience applications and comparison with current industrial standards through case studies », *Geomechanics for Energy and the Environment* 20, article 100117, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gete.2019.03.002>.
- HERRENSCHNEIDER, Emile-Alphonse, 2016**, *Versuch einer Ortsgeschichte von Weier auf'm Land*, Colmar, 1890 ; *Il était une fois Wihr-en-Plaine*, Horbourg-Wihr, 2016 (trad française de l'éd. originale allemande de 1890, complétée et illustrée par Charles Beck).
- HULIN, Guillaume, SIMON, François-Xavier & HATAMI, Nariman, 2017**, « AGT – Archaeological Geophysics Toolbox for QGIS », *ISAP News* 51, p. 7-8.
- MARTINAUD, Michel, 1990**, « Intérêts du dispositif bipôle C-P en prospection électrique non-mécanisée », *Revue Archéométrie* 14, p. 5-16.
- MARTY, Philippe, DARRAS, Lionel, TABBAGH, Jeanne, BENECH, Christophe, SIMON, François-Xavier & THIESSON, Julien, 2015**, « WuMapPy, an open-source software for geophysical prospection data processing », *11th Conference for Archaeological Prospection*, Warszawa, p. 563-566.
- SIMON, François-Xavier, 2012**, *L'apport de l'outil géophysique pour la reconnaissance et la caractérisation des sites en archéologie préventive, méthodes et perspectives : exemples en Alsace*, Thèse de doctorat, Université Paris 6.
- WATTERS, Meg, 2009**, « The complementary nature of geophysical survey methods », in CAMPANA, Stefano & PIRO, Salvatore (dir.), *Seeing the Unseen, Geophysics and Landscape Archaeology*, p. 183-199.