

Discussions sur la complémentarité de la méthode géomagnétique et de l'imagerie aérienne pour l'étude des enceintes néolithiques du Centre-Ouest de la France

Guillaume BRUNIAUX, Victor LEGRAND, Éric BOUCHET,
François LÉVÊQUE, Catherine LOUBOUTIN, Vivien MATHÉ, Vincent ARD

Résumé : Le Centre-Ouest de la France, entre les fleuves Loire et Dordogne, est un secteur géographique riche en enceintes fossoyées du Néolithique, avec 311 sites référencés en 2020. Ces enceintes ont été en grande majorité découvertes par des prospecteurs aériens, ou à l'aide des photographies aériennes des services de l'État tel l'IGN, à partir d'indices phytologiques des fossés de l'enceinte. Depuis les années 2010, les prospections géomagnétiques sont de plus en plus utilisées, en complément de la prospection aérienne, pour cartographier ces sites ceinturés. Ce type de prospection géophysique offre une approche complémentaire qui s'exprime, par exemple, par la détection des petites structures d'aménagement des entrées, des palissades et des trous de poteau qui sont rarement visibles en indices phytologiques sur les clichés aériens. Le nombre de prospections géomagnétiques sur des enceintes néolithiques a été considérablement augmenté grâce à l'ANR MONUMEN qui a permis la prospection de dix-huit sites entre fin 2018 et début 2020. Cet ensemble d'enceintes permet de qualifier et de quantifier l'apport de la prospection géomagnétique par rapport à la prospection aérienne sur plusieurs points : 1) l'influence de la géologie locale sur la qualité des clichés aériens et sur leur déficit d'information par rapport à la prospection géomagnétique ; 2) une comparaison de l'architecture des enceintes vue sur les clichés aériens par rapport à celle observée sur les cartes des anomalies magnétiques ; 3) la qualité et la quantité des détails visibles sur les cartes des anomalies magnétiques en comparaison des images aériennes ; 4) la dynamique du signal des fossés en relation avec l'hétérogénéité et la nature des matériaux dans le comblement qui sont rarement visibles sur les photographies aériennes.

Mots-clés : Néolithique, enceinte fossoyée, prospection géomagnétique, photographie aérienne, indice phytologique, Centre-Ouest de la France.

Abstract: A total of 312 Neolithic causewayed enclosures were referenced in 2020 between the rivers Loire and Dordogne in Central-Western France. Most of these enclosures were discovered using aerial photography, which highlight the cropmarks of the enclosure ditches, taken by prospectors or by State services such as the IGN. Since the 2010s, in addition to aerial survey, geomagnetic surveys are increasingly used to map these enclosed sites. Geomagnetic surveying offers a complementary approach, which enables the detection of small entrance features, palisades and postholes rarely visible in the cropmarks seen on aerial photos. The number of geomagnetic surveys of Neolithic enclosures has considerably increased thanks to the ANR MONUMEN with the survey of more than eighteen sites between the end of 2018 and the beginning of 2020. These new surveys have led us to qualify and quantify how geomagnetic survey has contributed to the study of these enclosures and to determine its complementarity in relation to aerial survey. The local geology influences the quality of aerial photos, as the appearance of cropmarks is conditioned by water stress. The latter is more or less important depending on the water retention capacity of the soil and thus depends on the nature of the soil and the bedrock. Cropmark visibility varies depending on the local bedrock and the restitution of the archi-

ture of the enclosure is more or less reliable. It was possible to quantify the loss of information by comparing aerial photos to the geomagnetic survey. Aerial images of enclosures located on a limestone substrate have an information loss of less than 33% compared to magnetic anomaly maps. On this type of bedrock, aerial photography is relevant and the cropmarks of the ditches can be superimposed on the geomagnetic survey. On the other hand, aerial photographs of enclosures located on a marly bedrock lose about 66 % of information compared to the magnetic anomaly maps. On this type of substratum, aerial photography is less relevant and part of the enclosure is not visible on the pictures.

A comparison of the enclosure architecture seen on the aerial photographs with that seen on the magnetic anomaly maps is also relevant. The enclosure of the Coteaux de Coursac at Balzac (Charente) is a site where the cropmarks of the ditches are visible only under certain conditions (hydric stress). The quality of the aerial images is excellent and highlights numerous causewayed structures (discontinuous ditches, fences, postholes). However, the aerial imagery does not match the magnetic anomaly map, which is more precise in its mapping of smaller causewayed features (palisades, postholes). Moreover, the variations of magnetization contrasts within the ditches are an indication of the variations of their fill. Aerial imagery is certainly relevant for mapping the architecture of an enclosure but is not as detailed as the geomagnetic survey.

When comparing the quality and quantity of the detail visible between the magnetic anomaly maps and the aerial images, magnetic anomaly maps are able to detect small causewayed features such as entrances, palisades and postholes. Several examples are presented here including the sites of le Pontet at Saint-Nazaire-sur-Charente (Charente-Maritime), la Vieille Garenne at Courcôme (Charente), le Peu at Charmé (Charente) and le Perradet at Saint-Groux (Charente). These small features are rarely visible on aerial photos. Some features have thermo-remanent magnetization from fire action, which can be detected by geomagnetic survey. This is the case at the site of le Peu at Charmé (Charente), where the postholes inside the enclosure mark several burnt buildings. The fills of the postholes are thermo-remanent magnetized and are visible on the magnetic anomaly map. These postholes are however not visible on the aerial photographs.

The dynamics of the magnetic signal or the magnetization contrast of the ditches of the Neolithic enclosures is not homogeneous and these variations reflect material heterogeneities in the ditch fill. These variations and their link to the magnetic signal were studied in the paper by Ard *et al.* (2015) on the Bellevue enclosure at Chenommet (Charente). They are not generally visible on aerial photographs, but can in rare cases be detected on aerial photographs, notably at the site of Bellevue at Chenommet (Charente).

To conclude, aerial and geomagnetic survey are complementary methods for the study of the architecture of Neolithic causewayed enclosures. Most sites are discovered by aerial survey, which is the primary source of information for mapping the ditches. These plans are based on the survey of ditch cropmarks, the appearance of which is governed by numerous factors making them difficult to predict from one year to another. Moreover, depending on the geological bedrock, the cropmarks are not always clearly identifiable and do not allow the entire architecture of the enclosure to be perceived. Finally, aerial photos are mostly shot at an oblique angle, which distorts distances and lengths. Orthorectification can alleviate this problem but is rarely used by volunteer prospectors. Magnetic prospecting allows the causewayed structures of these sites to be mapped with better resolution and accuracy.

Keywords: Neolithic, causewayed enclosure, geomagnetic prospection, aerial photography, cropmark, Centre-West of France.

La majorité des enceintes fossoyées du Néolithique a été découverte par prospection aérienne. Historiquement, le pionnier fut le français Antoine Poidebard qui découvrit en 1925 des vestiges en survolant le désert syrien (Nordiguian et Salles, 2000). L'importance des prospections aériennes pour la reconnaissance et la découverte des sites archéologiques est reconnue dans la littérature scientifique depuis 1928 avec la publication des Anglais Osbert Guy Stanhope Crawford et Alexander Keiller (1928), et par le premier programme d'archivage des photographies aériennes de sites archéologiques mise en œuvre au Royaume-Uni en 1965 par la RCHME (Commission royale des monuments historiques d'Angleterre ; Featherstone, 1999). Cette méthode non destructrice permet la détection des sites et donne un aperçu de l'emprise et de l'architecture d'un site, plus ou moins précis et complet selon les années et la nature des cultures.

Le Centre-Ouest de la France, approximativement compris entre la Loire et la Dordogne, est l'une des

régions d'Europe occidentale les plus riches en enceintes fossoyées du Néolithique. Plus de trois cents sites sont référencés, dont une grande partie a été découverte par photographie aérienne (Marsac et Joussaume, 1977 ; Joussaume, 1995 ; Burnez et Louboutin, 1999 ; Champême, 1999 ; Ollivier, 1999 ; Dassié, 2001 ; Ard, Aoustin *et al.*, 2016a). Les prospecteurs locaux, souvent des bénévoles dont, pour citer les plus connus de la région, Maurice Marsac, Alain Ollivier, Louis-Marie Champême, Jacques Dassié et Éric Bouchet, ont largement contribué à recenser ces sites dont les éléments les plus discriminants sont les fossés interrompus. En outre, le développement des couvertures aériennes du territoire et celui de la télédétection apportent de nouvelles sources d'images, pour la plupart consultables en ligne (Géoportail, Google Earth...). Les photographies aériennes sont les premières sources de mise en évidence de l'existence d'enceintes et offrent une vue d'ensemble permettant d'appréhender leur organisation spatiale. L'implantation des sondages

sur ces sites, en particulier en fouilles programmées, est très majoritairement positionnée à partir des plans des fossés livrés par ces photographies (Burnez et Façon, 1957 ; Burnez et Humphrey, 1966 ; Burnez, 1992 ; Burnez *et al.*, 1994 ; Joussaume et Burnez, 1996 ; Joussaume, 1999). Les premières fouilles d'enceintes dans le Centre-Ouest ont été initiées dès la fin du XIX^e siècle sur le site de Peu-Richard à Thénac (Charente-Maritime) par Eugène Eschassériaux (Eschassériaux, 1884), puis menées par Claude Burnez (Burnez et Façon, 1957 ; Burnez et Case, 1966) et suivies par Roger Joussaume (1982). Elles se focalisaient principalement sur les fossés avec pour objectifs l'étude de la dynamique de leur comblement mais aussi la compréhension de l'évolution architecturale des enceintes et l'établissement des premiers panoramas chrono-culturels, grâce au riche mobilier recueilli dans les fossés. La fouille extensive d'enceintes – fossés et surfaces internes – ont rarement été envisagées, et jamais menées à bien, en raison de l'extension de ces sites dont les surfaces sont comprises entre quelques hectares à plus d'une dizaine d'hectares (Joussaume, 1995 ; Burnez et Louboutin, 1999).

La faiblesse de la photographie aérienne est que les clichés d'une même zone diffèrent suivant les années en raison du caractère multifactoriel et difficilement prévisible de l'apparition des indices phytologiques (Stanjek et Faßbinder, 1995). Toutefois, des études récentes tentent de prédire leurs apparitions à partir de modèles multi-paramètres fondés sur la télédétection (Agapiou *et al.*, 2013 ; Moriarty *et al.*, 2019). Depuis la fin des années 1990, la prospection géophysique, instructive en elle-même, est apparue comme une approche complémentaire pour pallier ces limites (Hasek et Kovarnik, 1999 ; Kobyliński et Misiewicz, 2002 ; Hale et Cowley, 2009).

Dans le Centre-Ouest de la France, les essais pionniers de prospection géophysique sur les fossés d'enceintes ont été réalisés par méthode électrique (profils de résistivité apparente) sur le site du Moulin-de-Vent à Montils (Charente-Maritime) par Claude Burnez et Albert Hesse en 1967 (Burnez et Hesse, 1967). Plus de trente ans plus tard, de véritables cartographies de la résistivité apparente seront mises en œuvre sur plusieurs hectares sur les sites charentais du Camp à Challignac (Martinaud, 2004) puis de Diconche à Saintes (Martinaud, 2005). L'un des premiers essais de prospection géomagnétique a été réalisé sur le site de la Sauzaie à Soubise (Charente-Maritime) par Jean-Pierre Pautreau (1976). Ce type de prospection s'est montré particulièrement efficace pour révéler des structures fossoyées en Europe centrale et orientale, en Allemagne (Lück et Eisenreich, 1999 ; Schultze *et al.*, 2008), en Autriche (Eder-Hinterleitner *et al.*, 1996 ; Doneus *et al.*, 1998), République tchèque (Hasek et Kovarnik, 1999 ; Křivánek, 2006), en Hongrie (Salisbury *et al.*, 2013) et en Slovaquie (Nowaczinski *et al.*, 2012). Elle a également été largement employée, mais plus récemment, en Europe occidentale, au Royaume-Uni (Ovenden *et al.*, 2009 ; Gaffney *et al.*, 2012), au Portugal (Márquez

Romero *et al.*, 2011), en Italie (Ciminale et Loddo, 2001 ; Gallo *et al.*, 2009) et en France (Ghesquière *et al.*, 2011 ; Hamon et Hulin, 2011 ; Ard *et al.*, 2015, 2018). Ces études européennes ont montré l'efficacité de la prospection géomagnétique pour cartographier les sites à enceintes fossoyées. Cette méthode est de plus en plus utilisée en France, soit en amont des fouilles programmées pour déterminer l'implantation des sondages archéologiques (Ard, Aoustin *et al.*, 2016a ; Bruniaux *et al.*, 2016 ; Ard *et al.*, 2018), soit *a posteriori* pour compléter des plans de fouille (Ghesquière *et al.*, 2011 ; Hamon et Hulin, 2011 ; Camus *et al.*, 2014 ; Mathé *et al.*, 2012 ; Ard *et al.*, 2015).

Dans le Centre-Ouest de la France depuis le début des années 2010, la prospection géomagnétique est utilisée pour cartographier les enceintes néolithiques, dont la plupart ont été découvertes par photographie aérienne. Outre l'utilisation de cette méthode parallèlement à la fouille pour éclairer et compléter les données de terrain, la cartographie des sites par prospections géomagnétiques est utilisée pour documenter les organisations architecturales des enceintes fossoyées (Ard *et al.*, 2019). Cette documentation a été considérablement enrichie grâce à l'ANR MONUMEN qui a permis de cartographier seize enceintes en 18 mois. Sur la base de cette cartothèque, il est possible d'étudier les apports spécifiques et complémentaires de la cartographie géomagnétique et de la photographie aérienne pour la caractérisation des architectures des enceintes du Centre-Ouest de la France.

Cette étude analyse l'influence de la géologie locale sur la qualité des résultats des photographies aériennes et des cartes des anomalies magnétiques. Elle décrit aussi l'apport de la prospection géomagnétique à la prospection aérienne dans la description de l'architecture des enceintes, des différents types de structures (aménagements d'entrées, tranchées de palissade, trous de poteau...) et discute de la dynamique du signal des fossés en relation avec l'hétérogénéité et la nature des matériaux dans le comblement qui sont rarement visibles sur les photographies aériennes.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Imagerie aérienne

Conditions d'apparition des indices phytologiques

La découverte aérienne des enceintes fossoyées néolithiques repose principalement sur la présence, dans les champs en culture, d'indices phytologiques dont l'apparition est liée aux cycles phénologiques des cultures, principalement de céréales. Ce phénomène de contrastes dans la végétation est majoritairement lié à un stress hydrique qui correspond à une évapotranspiration plus importante que la réserve hydrique du sol. Dans une étude sur les *cropmarks* ⁽¹⁾ en Écosse, Charles Moriarty (Moriarty *et al.*, 2019) montre que les saisons estivales sèches (avec

une moyenne des précipitations plus faible que lors des autres étés) se corrèlent assez bien avec un nombre plus important de nouveaux sites archéologiques découverts par prospection aérienne. Selon la nature du substrat, les propriétés physiques des sols (granulométrie, densité et porosité) et leurs épaisseurs, le stress hydrique sera plus ou moins fort. Il sera, par exemple, plus faible sur les sols de texture argileuse, à cause d'une rétention d'eau plus importante. La disponibilité en eau pour la plante sera plus forte avec un sol de texture fine et d'épaisseur importante. Les structures fossoyées sont des zones où l'épaisseur de sol diffère de l'encaissant en raison de leur creusement et de leur comblement. Suivant la nature lithologique du comblement (sédiments fins, grossiers ou blocs rocheux...), ces structures auront une réserve hydrique et de nutriments différentes de l'encaissant, induisant un retard, plus ou moins important, d'apparition du stress hydrique. Ce retard se matérialisera en photographie aérienne par des contrastes de couleur de la végétation entre les structures archéologiques et leur environnement (Stanjek et Faßbinder, 1995 ; Agapiou *et al.*, 2013, 2016 ; Moriarty *et al.*, 2019).

En raison des nombreux paramètres influençant les indices phytologiques, la prédiction de leurs apparitions est difficile (Stanjek et Faßbinder, 1995). Néanmoins, des études récentes (*e.g.* Agapiou *et al.*, 2013), montrent que la meilleure période d'observation de ces marques, celle qui offre les meilleurs contrastes, correspond à l'épiaison des céréales avec une fenêtre d'observation de 15 jours. Cette étude se fonde sur l'évolution d'un indice de végétation sur une série d'images satellites d'un cycle phénologique complet du blé.

Sources des images aériennes

Les images aériennes sont de deux types : les photographies obliques et les orthophotographies. Les premières sont acquises par des prospecteurs aériens, soit institutionnels (François Didierjean à l'Université Bordeaux-Montaigne et Bertrand Dousteysier à l'Université Clermont Auvergne), soit non-institutionnels (souvent bénévoles). Suivant les cas, des orthorectifications sont effectuées à l'aide d'un logiciel de photogrammétrie pour redresser les plans des structures. La résolution des photographies obliques dépend du type d'appareil utilisé (photographies numériques ou argentiques pour les plus anciennes), des caractéristiques optiques des appareils et de l'altitude de vol. La résolution des orthophotographies générées à partir de ces clichés est naturellement dépendante de ces paramètres.

La majorité des orthophotographies proviennent des campagnes de couverture photographique nationale réalisées dans le cadre du RGE® (Référentiel à Grande Échelle) par l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière). Ces orthophotographies sont réalisées tous les quatre à cinq ans. Elles sont indépendantes des conditions optimales d'observation des indices phytologiques et elles sont regroupées dans la BD ORTHO® et l'ORTHO HR® (consultables sur le service

en ligne Géoportail). Les orthophotographies de la BD ORTHO® ont une résolution spatiale de 0,5 m, celles de l'ORTHO HR® une résolution de 0,2 m. D'autres sources d'orthophotographies sont disponibles en accès libre sur Google Earth.

La dernière source d'images aériennes est le corpus des photographies historiques de l'IGN. Ces couvertures du territoire réalisées après la Seconde Guerre mondiale sont disponibles en libre accès auprès de l'IGN et consultables sur le service en ligne Géoportail. Ces photographies historiques permettent de remonter, quand la résolution est suffisante, à des premiers cas d'apparition de contrastes dans la végétation et permettent d'avoir des images dans des conditions pédoclimatiques plus variées.

Prospections géomagnétiques

Les prospections géomagnétiques sur les enceintes fossoyées ont été réalisées soit avec un gradiomètre fluxgate, soit avec des magnétomètres en champ total et dans certains cas suivant les deux protocoles. Le gradiomètre est un FEREX (*Foerster Institut*) composé de quatre capteurs de type *fluxgate* mesurant le gradient de la composante verticale du champ magnétique total. Ces capteurs sont disposés en ligne et espacés de 0,5 m les uns des autres. Ils possèdent une sensibilité de 0,3 nT (référence constructeur). L'échantillonnage des mesures est programmé à 10 mesures/m dans le sens des profils (chaque profil est espacé de 0,5 m), soit 20 mesures/m². Ceci permet de détecter des structures de petites dimensions dont les anomalies magnétiques mesurent seulement quelques décimètres, comme les trous de poteau (Ard *et al.*, 2015 et 2018). Les prospections magnétiques en champ total ont été réalisées avec deux magnétomètres à pompage optique. Le premier est un magnétomètre G-858 (*Geometrics*) composé de deux capteurs à vapeur de césium disposés horizontalement et espacés de 0,5 m. Ces capteurs possèdent un niveau de bruit de 0,1 nT à 10 Hz (Mathé *et al.*, 2006) et la fréquence d'acquisition est de 10 Hz. Le second est un magnétomètre GSMP-35G (*GEM System*) avec deux capteurs à vapeur de potassium disposés horizontalement et espacés de 0,5 m. La sensibilité est de 0,3 pT/√Hz (référence constructeur) et la fréquence d'acquisition est de 20 Hz. Le positionnement des mesures magnétiques est effectué soit par une station totale (Bruniaux *et al.*, 2017), soit par un GNSS⁽²⁾ (uniquement pour le GSMP-35G) avec précision absolue de 0,7 m. Suivant le protocole en champ total utilisé, la résolution spatiale est comprise entre 20 et 60 points/m². Les variations diurnes du champ magnétique terrestre sont ensuite retirées par une fonction polynomiale pour obtenir les cartes des anomalies magnétiques de la subsurface. Ces dernières sont ensuite réduites au pôle pour recentrer les anomalies par rapport à leurs sources (Baranov et Naudy, 1964). Pour les prospections menées dans le cadre de l'ANR MONUMEN, elles ont été réalisées avec le gradiomètre FEREX (*Foerster Institut*) ou le GSMP-35G (*GEM System*).

Les anomalies magnétiques associées à des structures creusées sont produites par un contraste d'aimantation entre la structure et son encaissant (substrat géologique). Ce contraste d'aimantation dépend des propriétés magnétiques du comblement. Les structures fossoyées sont en effet pour partie comblées par des apports des sols avoisinants, très souvent plus magnétiques que le substrat (Le Borgne, 1955). Elles bénéficient également de l'apport modéré en déchets organiques dû aux activités anthropiques qui entraîne une fermentation bactériologique de la matière organique qui modifie les conditions d'oxydo-réduction du milieu et favorise l'apparition d'oxydes de fer (Faßbinder *et al.*, 1990 ; Faßbinder et Stanjek, 1993 ; Linford, 2004 ; Glaser et Birk, 2012). De surcroît, les rejets de foyers (matériaux brûlés) et d'argiles cuites (céramiques) participe à l'augmentation du contraste d'aimantation entre une structure creusée et son encaissant (Ard *et al.*, 2015).

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

La figure 1 présente les 311 ⁽³⁾ enceintes néolithiques actuellement connues (jusqu'en 2020) dans le Centre-Ouest de la France. La grande majorité des enceintes (252) a été découverte par prospections aériennes et 25 d'entre elles ont été prospectées par des méthodes géophysiques, la plupart par des méthodes géomagnétiques. La majorité des enceintes est implantée sur les formations carbonatées du Bassin aquitain et du Bassin parisien. Moins d'enceintes sont référencées sur les formations métamorphiques et magmatiques du Massif armoricain. Ces formations sont moins favorables à l'apparition des indices phytologiques car la réserve hydrique des substrats métamorphiques et magmatiques est plus importante que celle des substrats calcaires. Le nombre moindre d'enceintes dans le Massif armoricain semble être plus liée à un biais d'observation.

Influence de la géologie locale

Les enceintes du Centre-Ouest sont principalement positionnées sur des hauteurs (plateau, butte, éperon...) dominant soit des vallées de rivières et de fleuves (Charente, Sèvre Niortaise, Vienne...), soit des paléovallées occupées par des marais littoraux (Marais poitevin, marais de Rochefort et de Brouage ; fig. 1). La majorité des enceintes connues dans la zone d'étude sont implantées sur les formations calcaires du Jurassique et du Crétacé. Suivant la position géographique et l'étage géologique, la lithologie du substrat calcaire varie : marnes, calcaires argileux, calcaires bioclastiques, calcaires fins, etc. Dans la zone d'étude, les formations superficielles d'altération développées sur ces substrats (argiles à silex, argiles de décalcification...) sont peu renseignées sur les cartes géologiques au 50000^e. Elles sont peu développées ou érodées (érosion naturelle ou travail du sol par l'agriculture) sur les sites prospectés dans cette étude. Ces

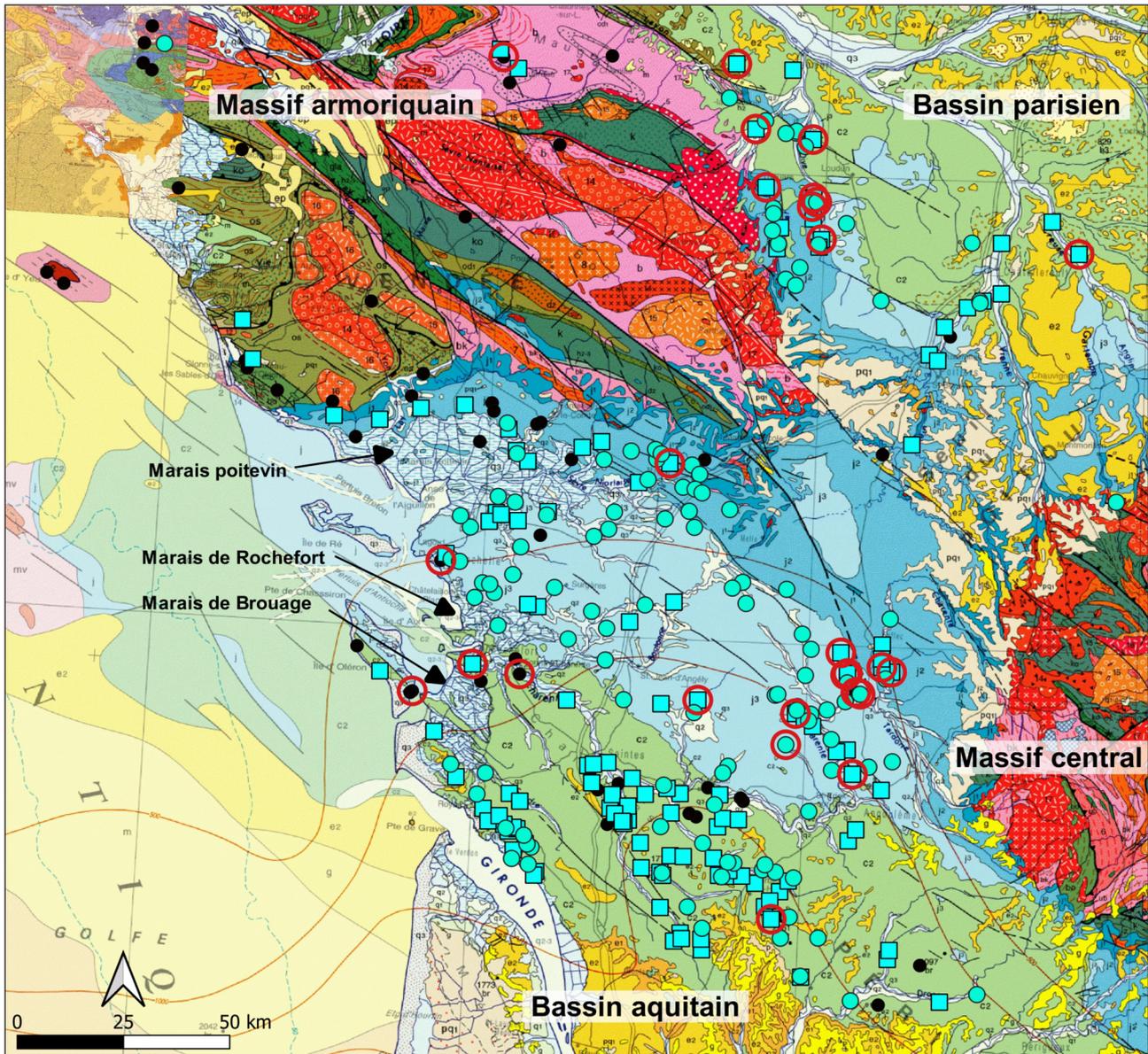
formations superficielles sont parfois mentionnées dans les publications des résultats des fouilles, comme pour l'enceinte néolithique des Loups à Échiré (Deux-Sèvres) où les altérites (argiles de décalcification) ont une épaisseur inférieure à 0,5 m et sont présentes très localement sous forme de poches (Burnez *et al.*, 1996). Pour conserver une vision synthétique, ces formations d'altération ne seront pas prises en compte dans ce travail, les informations étant trop éparées.

Certaines enceintes sont implantées sur d'anciennes terrasses alluviales ou en bordure de plaines alluviales. Dans ce cas, les faciès sédimentaires sont dominés par des graviers et des sables. Dans le Massif armoricain, les faciès sont métamorphiques avec des schistes et des faciès de roches magmatiques.

L'influence de la géologie locale se manifeste par la visibilité des indices phytologiques associés aux fossés (photographie aérienne) et par le contraste d'aimantation de ceux-ci avec leur encaissant (prospection géomagnétique). La capacité de détection des fossés par la photographie aérienne et par la prospection géomagnétique en fonction du substrat géologique a fait l'objet d'une synthèse : le nombre de segments de fossé visibles sur l'ensemble des photographies aériennes disponibles pour un site a été décompté et comparé au nombre de segments visibles sur la carte des anomalies magnétiques du même site. Les résultats de ces comptages sont présentés sur le tableau 1 et dix-huit enceintes ont été analysées pour effectuer cette synthèse.

Sur ce tableau (tabl. 1), les informations géologiques sur les substrats sont extraites des cartes géologiques au 50000^e du BRGM (Bourgueil *et al.*, 1972 ; Cariou *et al.*, 1973, 1983 ; Hantzpergue *et al.*, 1984 ; Bourgueil *et al.*, 1986 ; Legendre *et al.*, 1989 ; Joubert *et al.*, 2000). Pour synthétiser les différentes nuances des roches sédimentaires, cinq classes ont été créées : les calcaires (calcaires fins, bioclastiques, biodétritiques, noduleux et oolithiques), les calcaires argileux, les marnes, les alluvions anciennes (principalement des sables et graviers) et les faciès schisteux.

Suivant les faciès des substrats, l'évolution pédogénétique varie et les sols sont de natures différentes. Ils montrent des différences de texture, de minéralogie des argiles héritées et néoformées, de porosité, d'épaisseurs et de capacité de rétention d'eau, ce qui a un fort impact sur la végétation et, par extrapolation, sur l'apparition des indices phytologiques. Les familles de sols de chaque site proviennent de la carte des sols de l'IGN disponible sur le *Géoportail* (Messant *et al.*, 2019). Dans le tableau 1, les enceintes implantées sur les substrats calcaires sont associées principalement à des rendosols et des rendisols. Ces sols sont peu épais (moins de 0,35 cm) à textures limono-argileuses à limono-sableuses suivant les sites, très séchants et très perméables. Pour les enceintes sur des substrats de calcaires argileux et marneux, les familles de sol correspondent à des calcosols et des calcisols. Ils sont moyennement épais (plus de 0,35 cm) à textures argileuses à limono-argileuses suivant les sites, séchants et perméables. Pour les sites sur des alluvions



Enceintes fossoyées néolithiques du Centre-Ouest de la France

- Prospection aérienne exclusivement (123 enceintes)
- Prospection aérienne confirmée au sol (129 enceintes)
- Prospections géophysiques (25 enceintes)
- Autres (59 enceintes) : Prospections pédestres, Opérations préventives ou de sauvetages, Patriarche, Bibliographie

Fig. 1 – Carte géologique de la France au millionième (BRGM© ; IGN©). Localisation des sites à enceintes fossoyées du Centre-Ouest de la France. Les sites sont issus de la base de données Patriarche et vérifiés par Victor Legrand.

Fig. 1 – Geological map of France to the millionth (BRGM©; IGN©). Location of sites with causewayed enclosures in Central-Western France. The sites are imported from the Patriarche database and verified by Victor Legrand.

anciennes, ce sont des fluvisols et sur les faciès schisteux des brunisols.

Un exemple de comptage de segments de fossés est illustré avec deux sites : l’enceinte du Pontet à Saint-Nazaire-sur-Charente (Charente-Maritime ; tabl. 1, n° 10 ; fig. 2) et l’enceinte de la Vieille Garenne à Courcôme (Charente ; tabl. 1, n° 7 ; fig. 3). Chaque segment de fossé y est individualisé sur la photographie aérienne et sur la carte des anomalies magnétiques pour ces deux exemples (fig. 2 et 3).

L’enceinte du Pontet est implantée sur des calcaires fins du Crétacé supérieur (Turonien). Les indices phyto-graphiques de l’orthophotographie sont très proches du plan des fossés cartographié par méthode géomagnétique et les pinces de crabe sont visibles sur les deux sources (fig. 2). Néanmoins, la carte des anomalies magnétiques décompte plus de segments de fossé que l’orthophotographie. L’enceinte de la Vieille Garenne est implantée sur des calcaires argileux avec une intercalation de niveaux marneux du Jurassique supérieur (Oxfordien).

N°	Commune	Lieu-dit	Dépt.	Classe géologique	Famille de sol	Nombre segments de fossés sur les images aériennes	Nombre segments de fossés sur les cartes des anomalies magnétiques	Gain	Années d'images aériennes utilisées pour compter les segments de fossés
									(inventeur)
1	Chenommet	Bellevue	16	Calcaires	Rendisol	6	13	0,54	(S.Cassen) - 2009
2	Rouillac	Montauban	16	Calcaires	Rendosol	2	4	0,5	(P. Joy) - 2008, 2011
3	Charmé	Le Peu	16	Calcaires argileux	Calcosol	6	9	0,33	(E. Bouchet) - 2011
4	Balzac	Les Coteaux de Coursac	16	Calcaires	Rendosol	46	57	0,19	(J. Dassié) - 1999, 2010, 2011
5	Luxé	La Folatière	16	Calcaires argileux	Calcosol	0	11	1	(F. Lüth) - x
6	Charmé	L'Avenaude	16	Calcaires argileux	Calcosol	0	7	1	(F. Lüth) - x
7	Courcôme	La Vieille Garenne	16	Marnes/calcaires argileux	Calcisol	11	31	0,65	(J. Gomez de Soto) - 2017
8	Saint-Groux	Le Perradet	16	Alluvions anciennes	Rendisol/Fluvisol	5	13	0,62	(J. Dassié) - 2017
9	Bonneville	Bras-Melon	16	Alluvions anciennes	Fluvisol	15	6	-0,6	(J. Dassié) - 2011
10	Saint-Nazaire-sur-Charente	Le Pontet	17	Calcaires	Rendosol	23	32	0,28	(E. Bouchet) - 2006
11	Saint-Hippolyte	La Garenne	17	Calcaires argileux	Calcosol	0	7	1	(P. Burgaud) - x
12	Blanzac-lès-Matha	Fief Conteau	17	Calcaires argileux	Calcosol	7	19	0,63	(J. Dassié) - année ?, 1996
13	Beaupréau	Moulin Neuf	49	Schistes	Brunisol	16	39	0,59	(G. Leroux) - 1994, 1999
14	Thouars	Fertevault	79	Marnes/calcaires	Calcosol	3	7	0,57	(L.-M. Champême) - 1999, 2001
15	Saint-Laon	Aigré	86	Calcaires	Rendosol	7	8	0,13	(A. Ollivier) - 1965, 1999, 2009
16	Échiré	Les Loups	79	Calcaires	Rendosol	14	17	0,18	(M. Marsac) - 1980, 2014
17	Brie	Grosse Borne	86	Calcaires	Calcosol	4	6	0,33	(L.-M. Champême) - 2011
18	St.-Léger-de-Montbrillais	La Mangeoie	86	Marnes/calcaires	Calcisol	7	17	0,59	(F. Renard) - 2011, 2014

Tabl. 1 – Tableau regroupant l'ensemble des enceintes néolithiques prospectées par méthode géomagnétique pour réaliser cette étude. Les décomptes de segments de fossés identifiés sur les images aériennes (avec les années des clichés utilisés) et les prospections géomagnétiques sont détaillés pour chaque site ainsi que le gain.

Table 1 – Table of all Neolithic enclosures surveyed by geomagnetic methods for this study. Ditch segments identified on aerial images were counted (with the years of the shots used) and geomagnetic surveys are detailed for each site.

L'architecture globale donnée par la photographie oblique est assez proche de celle de la carte fournie par la géophysique (fig. 3a). Cependant, des segments de fossés sont plus longs sur la carte des anomalies magnétiques que sur la photographie aérienne (notamment les fossés 2 et 3). De plus, les pinces de crabe ne sont pas visibles sur le cliché, tout comme plusieurs segments de fossé, en particulier les plus au sud. Ces derniers sont localisés sur un niveau de marnes (zone plus sombre sur la photographie aérienne et zone plus magnétique sur la carte des anomalies magnétiques). Sur le site de la Vieille Garenne, les fossés sont plus visibles sur les calcaires argileux. Cette différence montre une influence de la géologie locale sur la présence des indices phytologiques des fossés.

Pour quantifier la complémentarité et l'apport respectif de la prospection géomagnétique et de la pho-

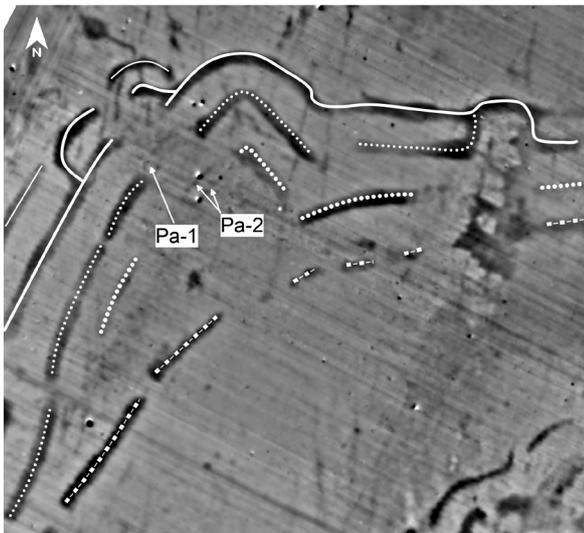
tographie aérienne, un indice est calculé pour chaque enceinte. Cet indice correspond au gain du nombre de segments de fossés décomptés sur les cartes des anomalies magnétiques par rapport aux clichés aériens pour chaque enceinte (tableau 1). L'utilisation des segments de fossés comme objets de comparaison a été choisi car ils sont visibles et facilement associables entre les deux méthodes. La présence de palissades, d'aménagements d'entrée et de trous de poteau n'est pas prise en compte pour comparaison mais sera discutée plus en détails par la suite. Le gain de chaque enceinte est déterminé par cette équation :

$$\text{gain} = F_m - F_a F_{max}$$

Avec :

F_m : nombre de segments de fossés décomptés sur une carte des anomalies magnétiques d'une enceinte ;

Enceinte du Pontet
(Saint-Nazaire-sur-Charente, Charente-Maritime)



BDORTHO®, IGN®

Date du cliché : 2006

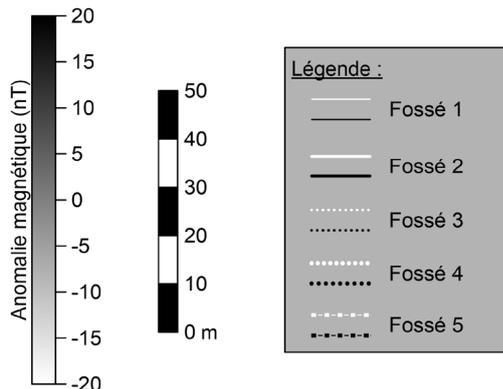


Fig. 2 – Le Pontet à Saint-Nazaire-sur-Charente (Charente-Maritime). Segments de fossés détectés sur la carte des anomalies magnétiques réduites au pôle (prospection géomagnétique réalisée en 2015 : G. Bruniaux, V. Mathé, F. Lévêque, A. Camus) et sur la photographie aérienne de 2006. « Pa-1 » et « Pa-2 » sont des tranchées de palissade.

Fig. 2 – Le Pontet at Saint-Nazaire-sur-Charente (Charente-Maritime). Ditch segments detected on the map of reduced magnetic anomalies (geomagnetic survey carried out in 2015: G. Bruniaux, V. Mathé, F. Lévêque, A. Camus) and on the aerial photo of 2006. "Pa-1" and "Pa-2" are palisade trenches.

F_a : nombre de segments de fossés décomptés sur les photographies aériennes d'une enceinte ;

F_{max} : nombre maximum de segments de fossés décomptés d'une enceinte (photographie aérienne et carte des anomalies magnétiques confondues).

Le gain est une valeur comprise entre -1 et $+1$. Quand il est positif, la prospection géomagnétique apporte des compléments d'information sur l'architecture de l'enceinte par rapport à la photographie aérienne (gain pour la prospection géomagnétique). Pour un gain négatif, la prospection géophysique n'apporte pas de complément d'information sur l'architecture de l'enceinte (gain pour la prospection aérienne). Plus le gain est proche de zéro, plus l'architecture de l'enceinte est similaire sur les deux sources.

Le gain a été reporté sur la figure 4. Ce graphique montre la répartition du gain de chaque enceinte en fonction de la lithologie du substrat, du type de sols et du nombre maximum de segments de fossé identifiés. De manière générale, le gain est favorable à la prospection géomagnétique (gain positif), hormis pour le site du Bras-Melon à Bonneville (Charente ; fig. 4, n° 9) où le gain est favorable à la prospection aérienne (gain négatif).

À partir de ce graphique, il est possible d'identifier trois ensembles suivant les valeurs du gain et la lithologie du substrat. Le premier ensemble correspond aux enceintes implantées sur les calcaires (classe 1), le second ensemble concerne les enceintes sur des substrats de calcaires argileux, marneux et métamorphiques (classe 2, 3 et 5) et le troisième ensemble regroupe les enceintes établies sur les alluvions anciennes (classe 4).

Pour le premier ensemble (enceintes implantées sur des substrats calcaires ; fig. 4, classe 1), les photographies aériennes montrent que les indices phytologiques des fossés sont très proches de l'architecture documentée par la géophysique. En effet, le gain est inférieur à $0,5$ et indique que plus de la moitié des segments de fossé est visible sur les clichés (décomptés cumulés de tous les clichés disponibles pour un site) par rapport aux segments de fossé décomptés sur les cartes des anomalies magnétiques. Sur ce type de substrat, l'imagerie aérienne est efficace pour décrire l'architecture globale de l'enceinte, comme le montre le site du Pontet à Saint-Nazaire-sur-Charente (fig. 4, n° 10 ; fig. 2). Sur ces calcaires, les sols sont de la famille des rendisols et des rendosols (fig. 4). Ces sols sont peu profonds, très séchant et très perméables et les fossés jouent très bien leurs rôles de réserve hydrique avec des indices phytologiques bien contrastés. De plus, ces sols présentent aussi un fort contraste d'aimantation avec leurs roches mères qui sont peu ou pas magnétiques. Sur ces substrats et ces sols, la prospection géomagnétique offre une restitution plus précise des plans architecturaux des enceintes grâce à la détection de structures fossoyées de plus petites dimensions (aménagements des entrées, tranchées de palissade, etc. ; fig. 2).

Le second ensemble décrit les enceintes implantées sur des substrats de calcaires argileux (fig. 4, classe 2) et marneux (classe 3). Le gain est compris entre $0,33$ et $0,66$. Les enceintes sur les substrats de calcaires argileux

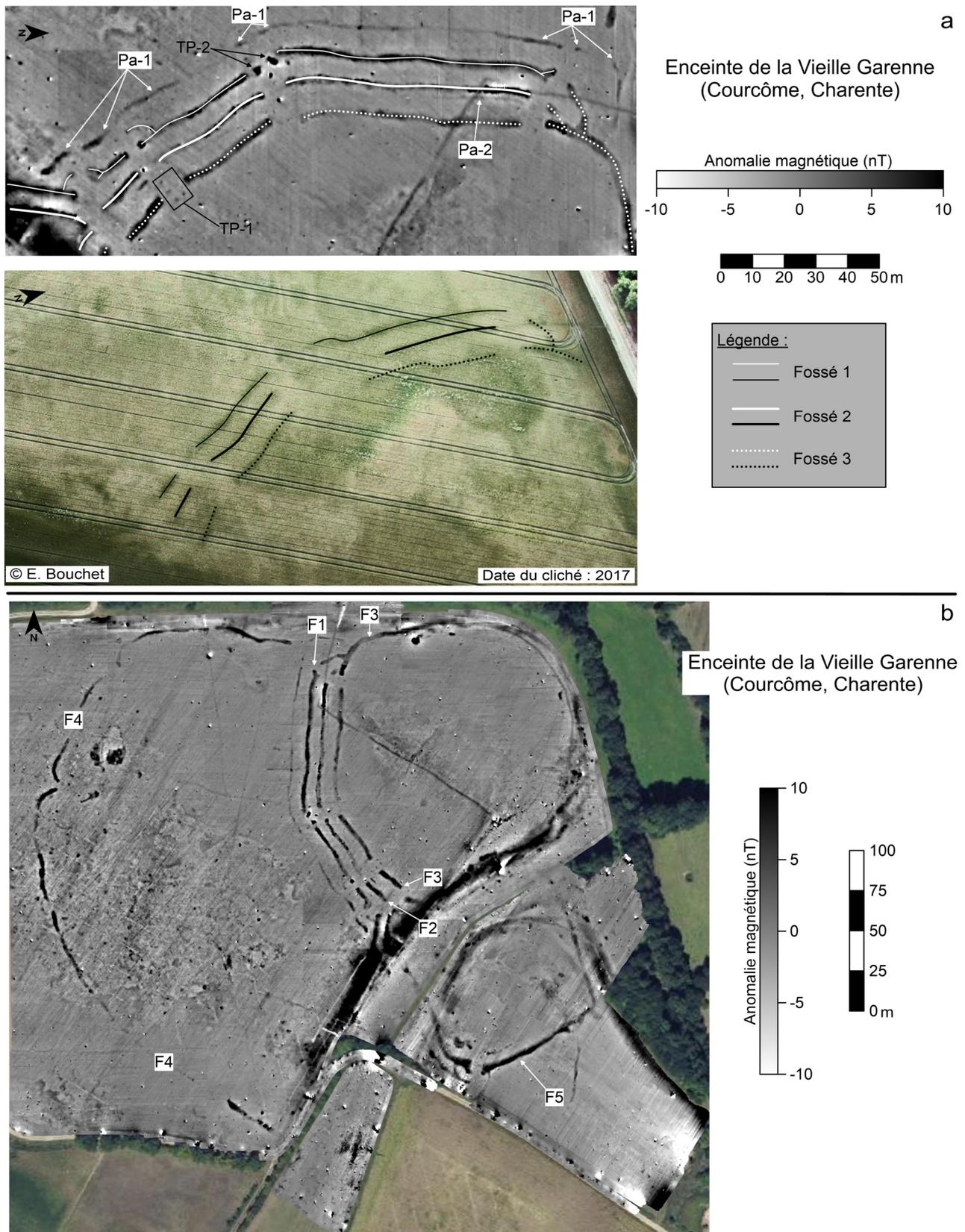
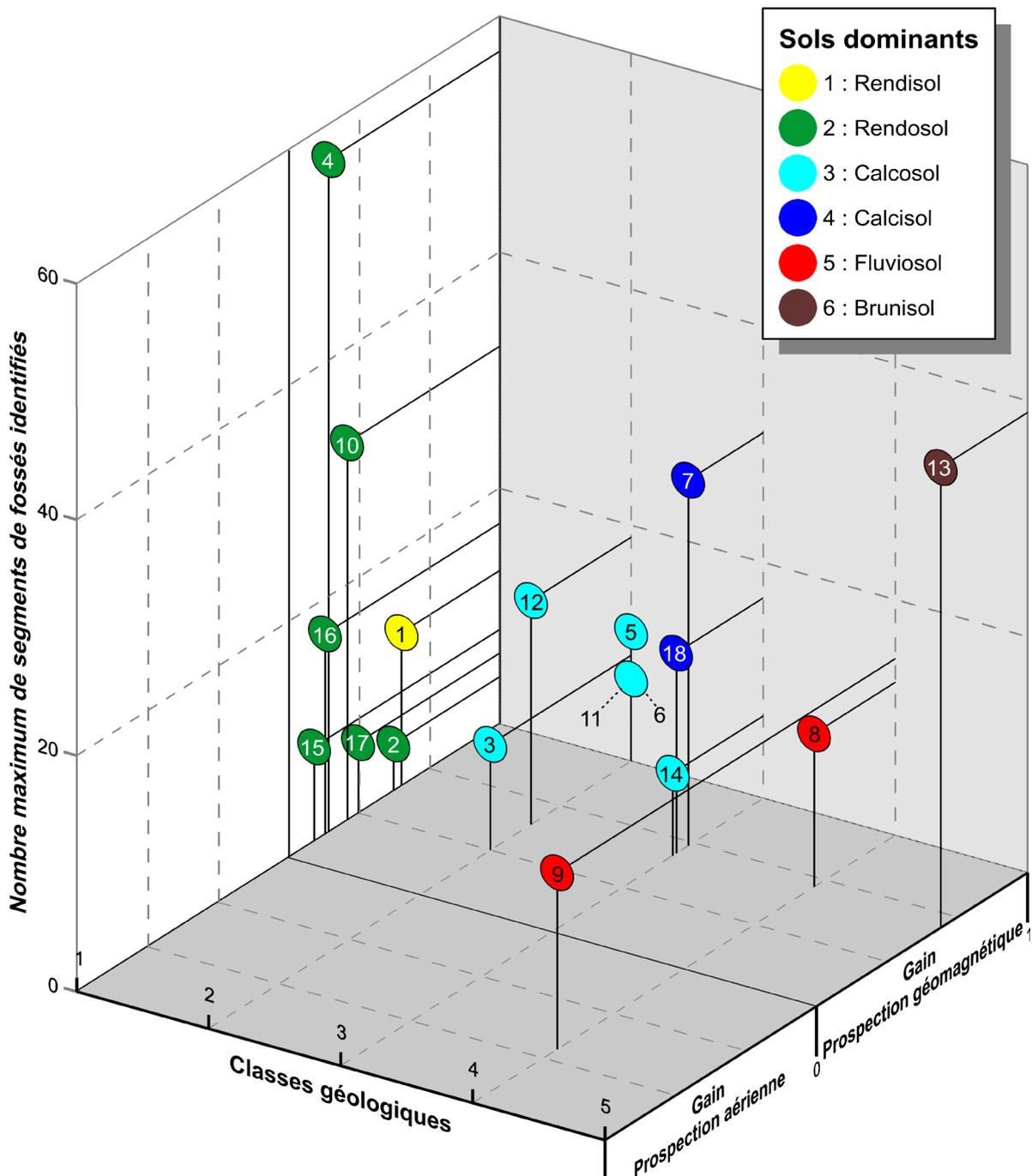


Fig. 3 – La Vieille Garenne à Courcôme (Charente) : **a**, segments de fossés détectés sur un extrait de la carte des anomalies magnétiques réduites au pôle (prospection géomagnétique réalisée en 2019 : G. Bruniaux, V. Legrand) et sur la photographie aérienne de 2017. « Pa-1 » et « Pa-2 » sont des tranchés de palissade et « TP-1 » et « TP-2 » des trous de poteau aménageant les entrées ; **b**, carte des anomalies magnétiques de l'enceinte de la Vieille Garenne dans son intégralité et localisation de ces cinq fossés discontinus.

Fig. 3 – La Vieille Garenne at Courcôme (Charente): **a**, ditch segments detected on the map of reduced magnetic anomalies (geomagnetic survey carried out in 2019: G. Bruniaux, V. Legrand) and on the 2017 aerial photograph. "Pa-1" and "Pa-2" are palisade trenches and "TP-1" and "TP-2" are postholes at the entrances ; **b**, magnetic anomaly map of the entire Vieille Garenne enclosure and location of the five discontinuous ditches.



- 1 - Bellevue, Chenommet (Charente)
- 2 - Montauban, Rouillac (Charente)
- 3 - Le Peu, Charmé (Charente)
- 4 - Les Coteaux de Coursac, Balzac (Charente)
- 5 - La Folatière, Fontenille (Charente)
- 6 - L'Avenaude, Charmé (Charente)
- 7 - La Vieille Garenne, Courcôme (Charente)
- 8 - Le Perradet, Saint-Groux (Charente)
- 9 - Le Bras Melon, Bonneville (Charente)

- 10 - Le Pontet, Saint-Nazaire-sur-Charente (Charente-Maritime)
- 11 - La Garenne, Saint-Hippolyte (Charente-Maritime)
- 12 - Le Fief Conteau, Blanzac-lès-Matha (Charente-Maritime)
- 13 - Moulin Neuf, Beaupréau-en-Mauges, (Maine-et-Loire)
- 14 - Fertevault, Thouars (Deux-Sèvres)
- 15 - Aigre, Saint-Laon/Arçay (Vienne)
- 16 - Les Loups, Echiré (Deux-Sèvres)
- 17 - La Grosse Borne, Brie (Vienne)
- 18 - La Mangeois, Saint-Léger-en-Montbrillais (Vienne)

Fig. 4 – Graphique illustrant la répartition du gain en fonction des classes géologiques et du nombre maximum de segments de fossés identifiés sur les photographies aériennes et les cartes des anomalies magnétiques. Le code couleur correspond aux familles de sols associées aux différents sites et extrait de la carte des sols (Messant *et al.*, 2019). Le gain est un indice pour estimer l'apport de la prospection géomagnétique à l'imagerie aérienne en termes de détection des segments de fossés d'une enceinte. Classes géologiques : 1, calcaires ; 2, calcaires argileux ; 3, marnes ; 4, alluvions anciennes ; 5, schistes.

Fig. 4 – Graph illustrating the distribution of gain according to geological classes and the maximum number of ditch segments identified on the aerial photographs and magnetic anomaly maps. The colour code corresponds to soil families found on the different sites and extracted from the soil map (Messant *et al.*, 2019). The gain is an index for estimating the contribution of geomagnetic prospecting to aerial imagery in terms of detecting ditch segments in an enclosure. Geological classes: 1, limestone; 2, clayey limestone; 3, marl; 4, ancient alluvium; 5, shist.

Enceinte du Fief Conteau à Blanzac-lès-Matha (Charente-Maritime)



Fig. 5 – Le Fief Conteau à Blanzac-les-Matha (Charente-Maritime). Photographie aérienne prise par Jacques Dassié. Carte des anomalies magnétiques de l'enceinte fossoyée (prospection géomagnétique réalisée en 2019 : G. Bruniaux, V. Legrand).

Fig. 5 – The Fief Conteau at Blanzac-les-Matha (Charente-Maritime). Aerial photo taken by Jacques Dassié. Map of the magnetic anomalies of the causewayed enclosure (geomagnetic prospection carried out in 2019 : G. Bruniaux, V. Legrand).

se rapprochent du gain de celles sur les substrats calcaires. Sur ce second ensemble, les sols sont associés à la famille des calcosols et des calcisols. Ils sont plus profonds, plus riches en argiles et moins séchant que les précédents. La réserve hydrique des sols y est légèrement plus importante et les contrastes des indices phytologiques sont moins marquées. Le gain des enceintes sur ces types de substrats et de sols plus argileux indique que les photographies

aériennes n'identifient que les deux tiers des segments de fossés par rapport à ceux mis en évidence sur les cartes des anomalies magnétiques. À noter que trois enceintes implantées sur des calcaires argileux n'ont jamais été repérées par prospection aérienne : la Folatière⁽⁴⁾ à Fontenille (Charente ; fig. 4, n° 5), l'Avenaude⁽⁴⁾ à Charmé (Charente ; fig. 4, n° 6) et la Garenne⁽⁵⁾ à Saint-Hippolyte (Charente-Maritime ; fig. 4, n° 11). Cette moindre capacité de la prospection aérienne à détecter les fossés creusés dans de tels substrats s'exprime différemment suivant les sites, comme l'illustrent les exemples suivants :

- sur l'enceinte du Fief Conteau à Blanzac-lès-Matha (fig. 4, n° 12), le plan global est visible sur la photographie aérienne, mais une grande partie des interruptions et des entrées ne sont pas identifiables (fig. 5) ;

- sur l'enceinte du Peu à Charmé (fig. 4, n° 3), implantée sur un petit promontoire en tête de vallon dont les bas de versants sont bordés par des anciens marais, seul le fossé en position sommitale n'est pas visible sur la photographie aérienne (fig. 6). Néanmoins, les indices phytologiques du site sont précis, avec la mise en évidence de pinces de crabe, d'interruptions des fossés et d'une palissade, uniquement visible sur les versants. Sur la carte des anomalies magnétiques, c'est l'inverse : le fossé, la palissade et les pinces de crabe sont clairement visibles sur la partie sommitale du site et le signal des structures fossoyées s'atténue vers les bas de versants à cause de sols hydromorphes à l'approche de l'ancien marais (Ard, Aoustin *et al.*, 2016b), impliquant un faible contraste d'aimantation entre les sols et l'encaissant, l'hydromorphie atténuant l'enrichissement magnétique pédogénétique ;

- sur l'enceinte de la Vieille Garenne à Courcôme (fig. 4, n° 7), une grande partie du site n'apparaît pas sur la photographie aérienne (fig. 3b). Seuls les fossés F1 à F3 sont visibles sur le cliché alors que deux autres ensembles fossoyés, F4 et F5, ont été mis en évidence par la prospection géomagnétique, accroissant fortement l'emprise du site.

Dans les deux premiers exemples, la photographie aérienne est pertinente et se rapproche du plan de l'enceinte cartographiée par méthode géomagnétique ; seule une partie des entrées et des interruptions n'est pas identifiée. Dans le troisième exemple, hormis le fait qu'elle a permis la découverte du site, la photographie est peu pertinente car elle en sous-estime l'emprise totale du site et ne permet pas de décrire le plan complet de l'enceinte.

Sur les substrats schisteux, le gain semble comparable à celui des substrats marneux. Néanmoins, il est difficile de généraliser ce résultat puisque, dans nos échantillons d'enceintes, seule l'enceinte du Moulin-Neuf à Beau-préau (Maine-et-Loire ; fig. 4 n° 13) a fait l'objet d'une prospection géomagnétique.

Sur le graphique de la figure 4, on constate que la qualité des indices phytologiques pour décrire l'architecture des enceintes dépend du substrat et des types de sol. Ceci reste toutefois une approximation, car l'apparition de ces contrastes est régie par d'autres facteurs tels que la présence de formations superficielles ou d'altérites (argiles

Enceinte du Peu à Charmé (Charente)

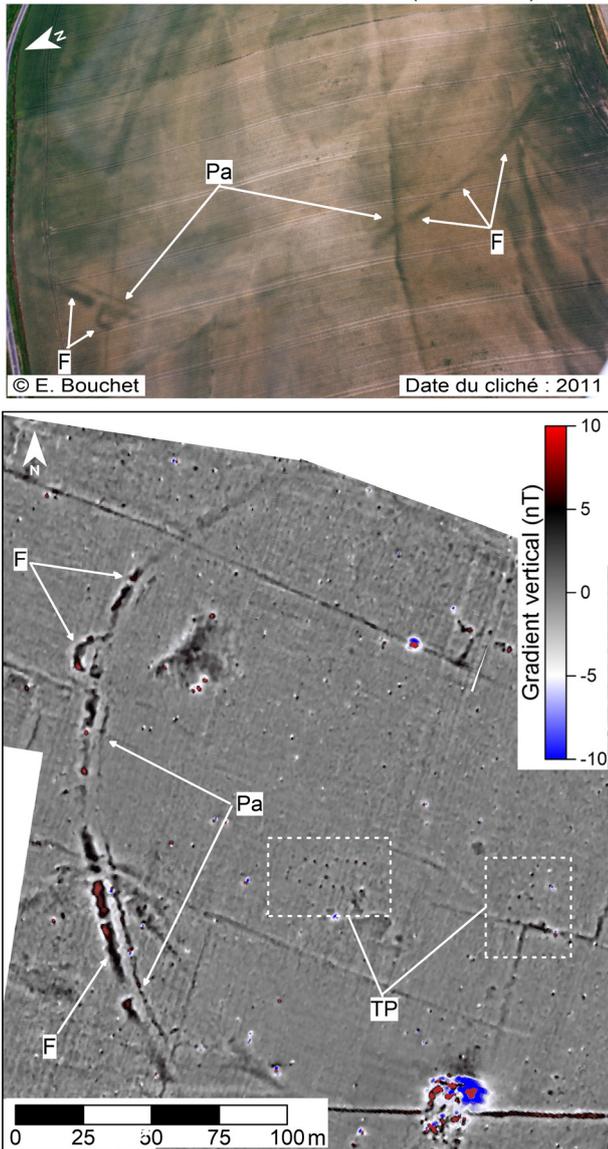


Fig. 6 – Le Peu à Charmé (Charente). Photographie aérienne de l'enceinte fossoyée prise en 2011 par Éric Bouchet. Carte des anomalies magnétiques de l'enceinte fossoyée (prospection géomagnétique réalisée en 2013 : V. Mathé, V. Legrand, G. Bruniaux). « F » est le fossé discontinu, « Pa » est la palissade et « TP » correspond aux trous de poteau associés à plusieurs bâtiments.

Fig. 6 – Le Peu at Charmé (Charente). Aerial photo of the causewayed enclosure taken in 2011 by Éric Bouchet. Map of the magnetic anomalies of the causewayed enclosure (geomagnetic survey carried out in 2013: V. Mathé, V. Legrand, G. Bruniaux). "F" is the discontinuous ditch, "Pa" is the palisade and "TP" corresponds to the postholes associated with several buildings.

à silex, argiles de décalcification...), le contexte pédoclimatique et le type de couverture végétale. Néanmoins, il permet de donner une réalité à la disparité de la qualité des indices phytologiques suivant la nature lithologique du substrat et des types de sols. Ce graphique offre une estimation rapide des lacunes de la photographie aérienne sur l'architecture d'une enceinte, simplement grâce à la connaissance de la géologie de surface, information four-

Enceinte du Bras-Melon à Bonneville (Charente)

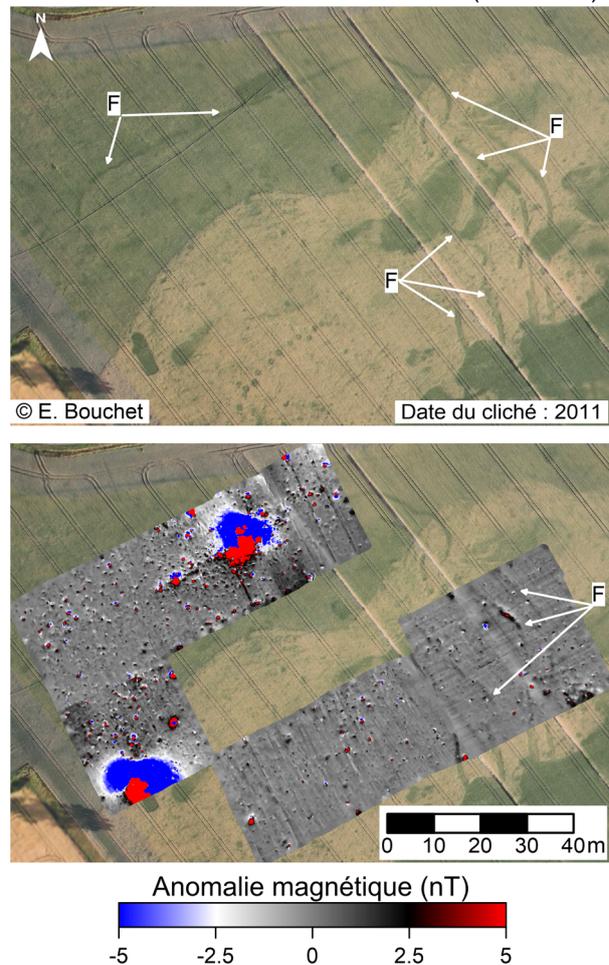


Fig. 7 – Bras Melon à Bonneville (Charente). Photographie aérienne de l'enceinte fossoyée prise en 2011 par Éric Bouchet. Carte des anomalies magnétiques de l'enceinte fossoyée (prospection géomagnétique réalisée en 2018 : G. Bruniaux ; V. Legrand). « F » sont les fossés discontinus.

Fig. 7 – Bras Melon at Bonneville (Charente). Aerial photo of the causewayed enclosure taken in 2011 by Éric Bouchet. Map of the magnetic anomalies of the causewayed enclosure (geomagnetic survey carried out in 2018: G. Bruniaux; V. Legrand). "F" are the discontinuous ditches.

nie par les cartes géologiques. De manière générale, les substrats calcaires sont les plus à même de fournir des contrastes de végétation proches des plans des fossés relevés à la fouille comme l'ont montré plusieurs études (Joussaume, 1999 ; Burnez et Louboutin, 2002 ; Ard *et al.*, 2015). En revanche, plus les substrats sont argileux, moins les indices phytologiques sont révélateurs de cette architecture. Cette différence s'explique par une rétention d'eau plus importante dans les sols développés sur des roches-mères plus argileuses, impliquant, pour les zones non fossoyées, un stress hydrique moins fort que dans des sols développés sur des roches plus calcaires. En effet, sur les substrats argileux, la végétation présente au-dessus des zones fossoyées ne réagit guère différemment de celle située directement au-dessus du substrat, l'argile ayant un important pouvoir de rétention d'eau, et les clichés aériens présentent donc des structures incomplètes.

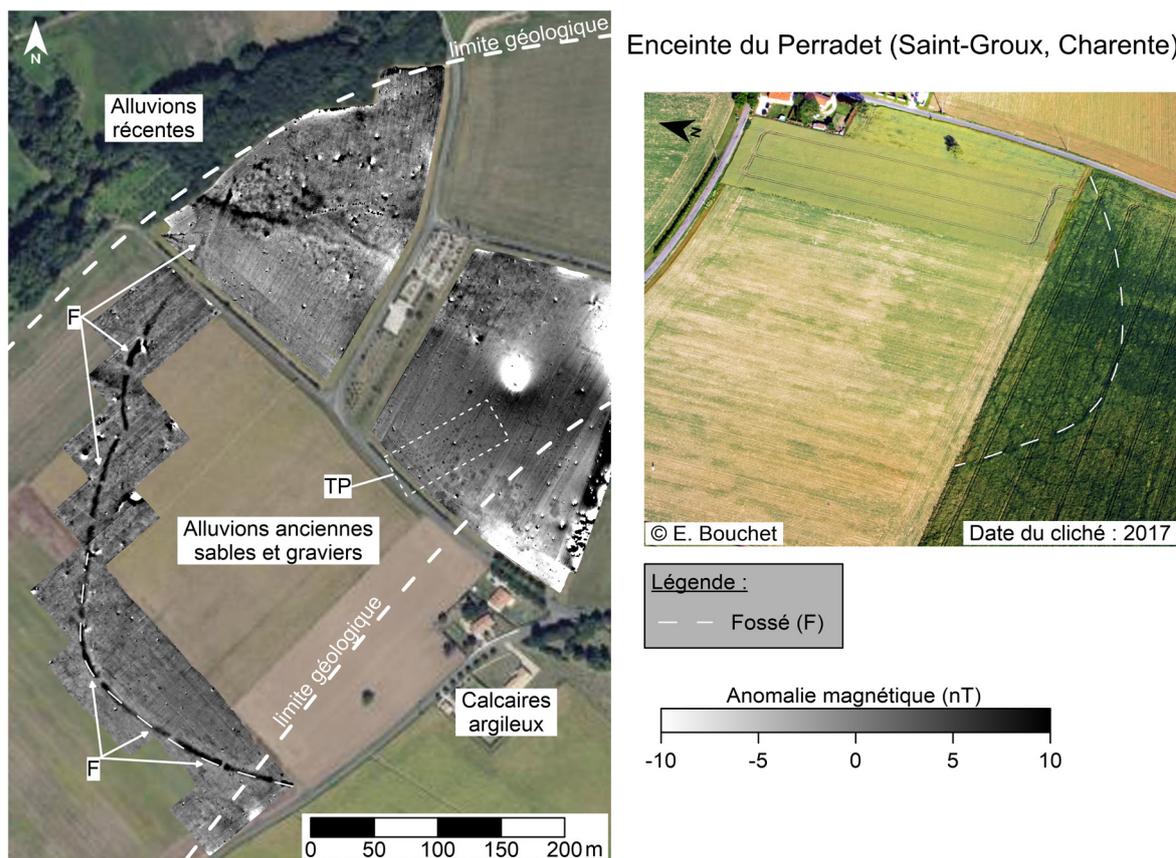


Fig. 8 – Le Perradet à Saint-Groux (Charente). Carte des anomalies magnétiques (prospection géomagnétique réalisée en 2019 : G. Bruniaux, V. Legrand). Photographie aérienne de l'enceinte dont le substrat est composé par des alluvions anciennes. « F » est le fossé de l'enceinte, « TP » sont les trous de poteau à l'intérieur de l'enceinte pouvant être associée à plusieurs bâtiments.

Fig. 8 – Le Perradet at Saint-Groux (Charente). Map of reduced magnetic anomalies to the pole (geomagnetic survey carried out in 2019: G. Bruniaux, V. Legrand). Aerial photo of the enclosure whose substratum is composed of ancient alluvium. "F" is the enclosure ditch, "TP" are the postholes inside the enclosure which can be associated with several buildings.

Sur les alluvions anciennes, composées de matériaux sableux et graveleux avec une matrice plus ou moins argileuse, la prospection géomagnétique est peu efficace car le signal y est très faible, en raison de la très faible teneur en minéraux magnétiques du sol. Sur l'enceinte fossoyée du Néolithique et de l'âge du Bronze ancien du Bras Melon à Bonneville, en Charente (fig. 4, n° 9 ; fig. 7), l'architecture des fossés est nettement mieux visible sur le cliché que sur la carte des anomalies magnétiques (dont la prospection n'a pas été poursuivie compte tenu des résultats peu pertinents). Sur cette dernière, les structures fossoyées sont de très faibles intensités (moins de 0,5 nT) et peu lisibles. Ceci s'explique par des fossés encaissés dans une nappe alluviale de graviers et hydromorphe (Maitay *et al.*, 2022). Dans ces conditions, la prospection aérienne est largement plus efficace que la prospection géomagnétique : la valeur du gain est inférieure à -0,5 (fig. 4). Néanmoins, le site du Perradet à Saint-Groux, en Charente (fig. 4, n° 8 ; fig. 8) pourrait être un contre-exemple. Sur la figure 8, le cliché de 2017 montre la présence d'un fossé curviligne et discontinu sur une parcelle. La prospection géophysique, réalisée en 2019, a permis de poursuivre cette structure fossoyée. Le fossé possède un contraste d'aimantation avec son encaissant semblable

à ceux des enceintes sur des plateaux calcaires, même si cette enceinte semble être implantée sur des alluvions anciennes (gain proche de 0,66 ; fig. 4).

La géologie locale et les types de sols ont un impact sur la qualité des informations obtenues par photographie aérienne et prospection géomagnétique. La grande majorité des sites présentés dans cette étude sont implantés sur les formations carbonatées du Bassin aquitain et parisien. Dans ce contexte, la prospection géophysique apporte des compléments d'information sur l'architecture des fossés de l'enceinte par rapport aux clichés aériens. Pour compléter ces observations, il est nécessaire de comparer ces deux méthodes pour cartographier les particularités architecturales des enceintes telles que les pinces de crabe, les aménagements des entrées, les palissades et autres petites structures fossoyées.

Données des photographies aériennes et apport de la prospection géomagnétique

Architectures des enceintes

La caractérisation des architectures des enceintes par la photographie aérienne et les méthodes géomagnétiques

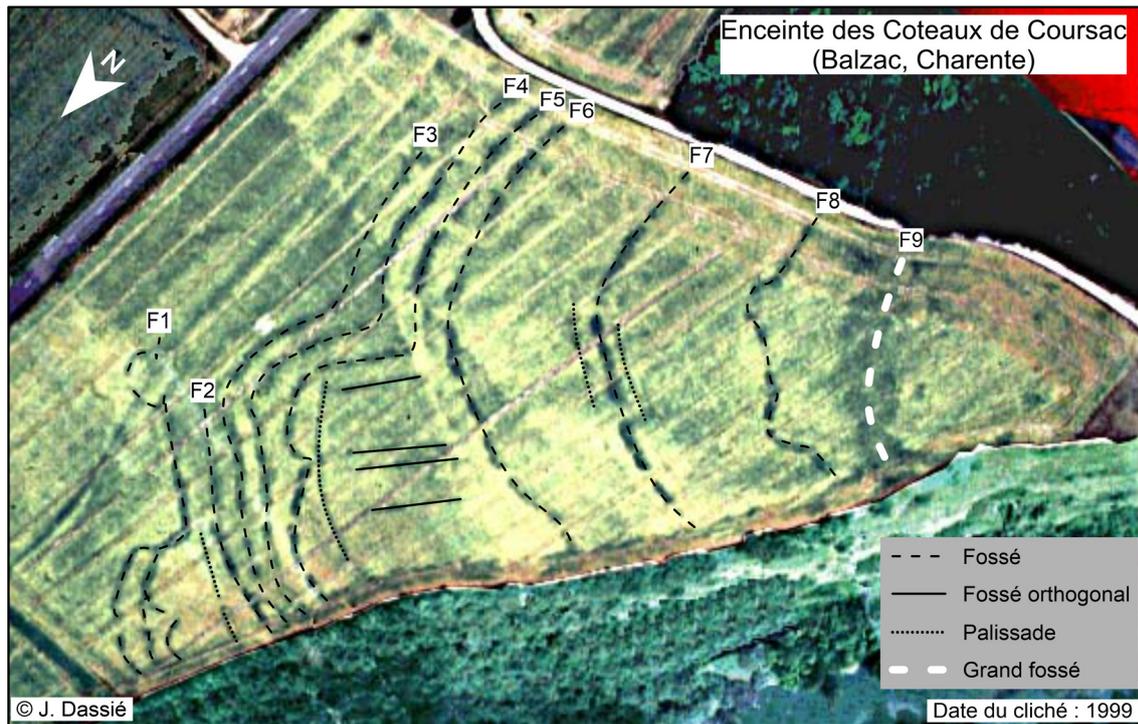


Fig. 9 – Les Coteaux de Coursac à Balzac (Charente).
Photographie aérienne de l'enceinte fossoyée prise en 1999 par Jacques Dassié.

Fig. 9 – Les Coteaux de Coursac at Balzac (Charente).
Aerial photo of the causewayed enclosure taken in 1999 by Jacques Dassié.

peut être abordée avec le site des Coteaux de Coursac à Balzac (Charente). L'enceinte des Coteaux de Coursac a été découverte lors du survol du site en 1999 par Jacques Dassié (fig. 9). Il s'agit d'un éperon barré caractérisé par neuf fossés formant plusieurs espaces imbriqués. Le site a été partiellement fouillé en 2000 et 2001 sous la direction de Catherine Louboutin, avec une tranchée longue de 200 m pour 2 m de large (environ 400 m²) le long de la bordure est du site et un sondage d'environ 2000 m² positionné sur la bordure nord-est de l'enceinte. Ces ouvertures ont mis en évidence cinq fossés, une tranchée simple, une tranchée flanquée de deux rangées de trous de poteau et deux lignes de trous de poteau plus récents que les structures précédentes (Burnez et Louboutin, 2002).

Le cliché de 1999 (fig. 9) montre dans le champ de céréales une série de marques correspondant à huit fossés interrompus curvilignes (F1 à F8) avec une largeur moyenne de 3 m. À l'extrémité de l'éperon, le fossé F9 est large de 9 m. Les indices phytographiques de ces fossés permettent de visualiser plusieurs interruptions dont certaines forment des pinces de crabe (fossés F1 et F8). Des tranchées étroites, considérées comme des tranchées de palissade, sont présentes entre les fossés F1 et F2, en arrière du fossé F5 et deux autres encadrent le fossé F7 dans la partie centrale du site. Le cliché de 1999 montre que la photographie aérienne est une méthode efficace pour caractériser l'architecture des enceintes avec une résolution suffisante pour identifier des structures fossoyées de faibles dimensions telles que les tranchées de palissade. D'autres clichés de cette enceinte ont été pris en 2010 et 2011 par Éric Bouchet (fig. 10), qui n'ap-

portent pas d'information supplémentaire sur l'architecture du site, hormis au niveau du large fossé F9. En effet, sur le cliché de 2011, ce fossé F9 est associé à des zones plus jaunes de forme ovale pouvant correspondre à des structures bâties. Il est à noter qu'au fil des ans les clichés sont de meilleure qualité en raison de l'évolution technologique des appareils photographiques et de la résolution des images. Les différents clichés du site des Coteaux de Coursac montrent une certaine répétabilité de la photographie aérienne mais aussi la nécessité de disposer de plusieurs clichés sur plusieurs années pour essayer d'obtenir un plan le plus complet et le plus clair possible. Si, d'une année à l'autre, l'apparition des contrastes de végétation est régulière, leur qualité est très hétérogène et ils autorisent une mise en lumière des structures inégale, en nombre et en qualité. En effet, parmi les prises de vue réalisées sur ce site par Jacques Dassié et Éric Bouchet depuis 1999, celles de 1999, 2010 et 2011 sont de loin les plus informatives (fig. 9 et 10). L'apparition des contrastes de végétation permettant la vision la plus « complète » du site est difficilement prévisible et les meilleures années peuvent être discontinues, espacées d'une à une dizaine d'années. Ce constat fait aux Coteaux de Coursac s'applique à d'autres sites ceinturés du Néolithique comme à l'enceinte de Bellevue à Chenommet (Charente), où les clichés aériens réalisés sur plusieurs années (1976, 2006 et 2009) montrent clairement l'évolution de l'interprétation du tracé des fossés (Ard *et al.*, 2012). Cette répétabilité d'apparition des marques dans les cultures, plus ou moins riche d'informations archéologiques, est liée aux conditions climatiques annuelles,

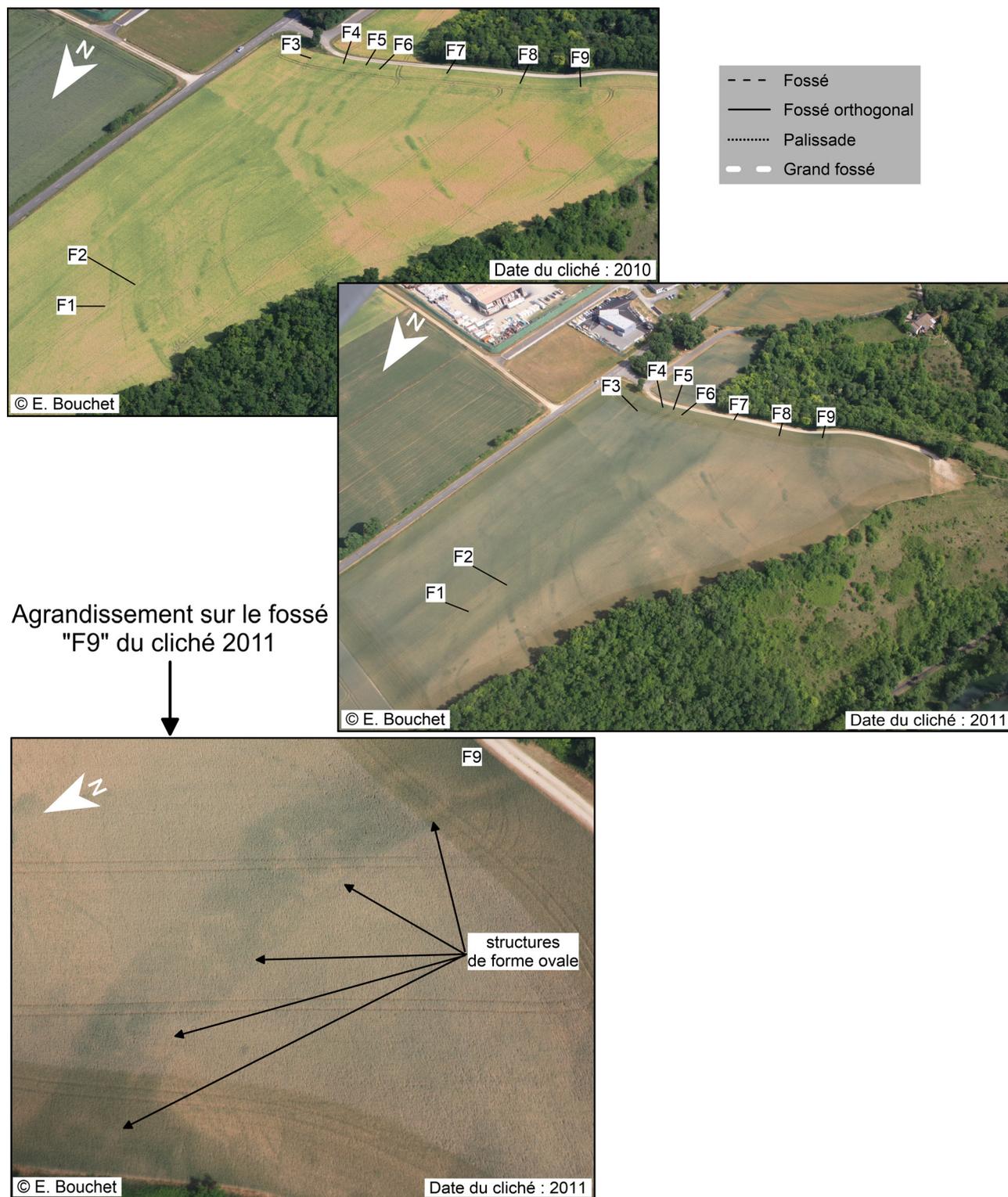


Fig. 10 – Les Coteaux de Coursac à Balzac (Charente). Photographies aériennes de l'enceinte fossyée prises en 2010 et 2011 par Éric Bouchet.

Fig. 10 – Les Coteaux de Coursac at Balzac (Charente). Aerial photos of the causewayed enclosure taken in 2010 and 2011 by Éric Bouchet.

aux substrats géologiques et à la nature et l'épaisseur des sols (Stanjek et Faßbinder, 1995 ; Agapiou *et al.*, 2016) et détaillés précédemment.

La prospection géophysique sur le site des Coteaux de Coursac a été réalisée en 2019. La carte des anomalies magnétiques est présentée sur la figure 11. De manière

générale, l'architecture de l'enceinte vue sur cette carte est très proche de celle des clichés de 1999, 2010 et 2011 (fig. 9 et 10). La carte des anomalies magnétiques montre les neuf fossés interrompus curvilignes (fig. 11), mais avec davantage de détails. Les aménagements des entrées (comme les pinces de crabe des fossés F1 et F3)



Fig. 11 – Les Coteaux de Coursac à Balzac (Charente). Carte des anomalies magnétiques de l'enceinte fossyée (prospection géomagnétique réalisée en 2019 : G. Bruniaux, V. Legrand).

Fig. 11 – Les Coteaux de Coursac at Balzac (Charente). Map of the magnetic anomalies of the causewayed enclosure (geomagnetic survey carried out in 2019: G. Bruniaux, V. Legrand).

et les structures tangentes au fossé F9 sont nettement plus visibles ; le nombre d'interruptions et de tranchées de palissade est précisé. En effet, la carte des anomalies magnétiques dénombre au moins dix tranchées de palissade (Pa), tandis que les photographies aériennes n'en avaient relevé que quatre. Deux d'entre-elles (Pa-1 et Pa-2) sont clairement associées à des lignes de trous de poteau ; ces aménagements étaient visibles sur les clichés de 1999 et 2011 (fig. 9 et 10), mais dans une extension et une lisibilité bien moindres. Elle montre aussi des diachronies dans l'architecture car les tranchées Pa-1 et Pa-2 recoupent certains fossés (F1 pour la tranchée Pa-1 ; F3 et F4 pour la tranchée Pa-2 ; fig. 11). Ces détails ne sont pas visibles sur les trois clichés aériens (fig. 9 et 10). Cette comparaison montre que la photographie aérienne est pertinente pour caractériser l'architecture globale d'une enceinte mais n'atteint pas le niveau de détails fourni par la prospection géomagnétique. Cette dernière apporte des informations pertinentes et complémentaires pour l'édification du plan architectural de cette enceinte. Cette conclusion peut être généralisée à de nombreuses enceintes du Centre-Ouest de la France, et est aussi confirmée par d'autres études en Europe (Hasek et Kovarnik, 1999 ; Křivánek, 2017).

Cependant, deux informations sont impératives à rappeler. D'une part, les enceintes sont avant tout découvertes par prospection aérienne et la prospection géomagnétique intervient pour compléter les observations faites sur les clichés aériens ; ces deux approches constituent deux étapes nécessaires pour l'étude de ces sites. D'autre part, la nature, la fonction, la chronologie et les associations ou disjonctions entre les structures sont imperceptibles, ou trop peu précisément qualifiables par l'une et l'autre méthode de prospection et seule la fouille peut autoriser une caractérisation fiable de ces sites.

Tranchées de palissade et aménagements des entrées

Certaines photographies aériennes présentent des indices phytologiques avec de nombreux détails sur des petites structures fossoyées telles que des tranchées de palissade, des petites pinces de crabe, des trous de poteau et divers aménagements d'entrées, mais seuls quelques sites sont concernés. Parmi les dix-huit enceintes prospectées, neuf présentent des tranchées de palissade relevées sur les cartes des anomalies magnétiques. Parmi ces neuf enceintes, quatre ont des tranchées de palissade visibles en indices phytologiques sur les clichés. Néanmoins, sur la plupart des images de ces enceintes, les tranchées de palissade sont incomplètes et la confirmation de leur présence n'est possible que par une prospection géomagnétique et/ou une fouille. Par exemple, les Coteaux de Coursac à Balzac et le Peu à Charmé sont deux sites à enceintes fossoyées sur lesquelles les photographies montrent des tranchées de palissade (fig. 6 et 9). La fig. 12 présente la partie nord du site des Coteaux de Coursac avec la carte des anomalies magnétiques et l'emprise des fouilles de 2000 et 2001 (fig. 12a), la

photographie oblique de 1999 (fig. 12b) et le plan des structures fossoyées relevées lors des fouilles (fig. 12c). Ici, la carte des anomalies magnétiques et la photographie aérienne montrent des plans des fossés très similaires. Les tranchées de palissade P1a et P1b et les alignements de trous de poteau associés sont identifiables sur les deux sources (fig. 12a et 12b). Ces détails visibles ont été confirmés par la fouille (fig. 12c) dont le plan se superpose quasiment avec celui obtenu par méthode géophysique. Sur la photographie aérienne, cet ensemble de tranchées de palissade (P1a et P1b) disparaît vers l'est. Toutefois, la carte des anomalies magnétiques permet de compléter la photographie aérienne en montrant la continuité vers l'est de cet ensemble architectural exceptionnel. La tranchée P2 est également associée à une ligne de trous de poteau clairement visible sur la carte des anomalies magnétiques, tandis que, sur le cliché, seuls quelques trous de poteau sont perceptibles. Citons, parmi d'autres exemples, les structures d'aménagement d'entrées (TP-1, TP-2) et les tranchées de palissade (Pa-1, Pa-2) du Pontet à Saint-Nazaire-sur-Charente (fig. 2) et de la Vieille Garenne à Courcôme (fig. 3a). Elles ne sont visibles sur aucune photographie aérienne, probablement parce qu'elles sont trop peu larges et trop peu profondes, mais elles sont de dimensions suffisantes pour être détectées par la prospection géomagnétique. Le succès de la méthode pour ces petites structures peut aussi être lié à leurs propriétés magnétiques. Sur l'enceinte du Peu à Charmé, des trous de poteau dessinant quatre bâtiments néolithiques ont été détectés dans l'espace interne de l'enceinte (TP, fig. 6). La fouille, en 2015 et 2016, de ces quatre bâtiments a montré des traces de combustion des poteaux (calcaires et silex rubéfiés, charbons de bois, fragments de poteaux calcinés) attestant d'un incendie (Ard, 2016 ; Ard, Aoustin et al., 2016a ; Ard et al. 2018). Or la chauffe à plus de 575°C, puis le refroidissement, induisent la création d'une aimantation thermorémanente et le renforcement de l'aimantation induite avec la néoformation de minéraux magnétiques (Le Borgne, 1960). Ceci entraîne une augmentation de l'intensité du signal et favorise la détection de ces structures par prospection géomagnétique. Ces propriétés (aimantation induite et rémanente) sont un atout supplémentaire en faveur de cette méthode pour la détection des structures archéologiques, notamment pour les plus petites comme les trous de poteau, par rapport à la photographie aérienne. Néanmoins, cela ne signifie pas que tous les trous de poteau visibles en prospection géomagnétique sont des structures brûlées. Le fait qu'ils aient subi un incendie facilite leur détection grâce à une aimantation plus importante.

Sur les Coteaux de Coursac, l'épaisseur de sol recouvrant les structures est comprise entre 0,15 et 0,2 m (rendosol). La tranchée de palissade P1 a une largeur comprise entre 0,75 et 0,9 m et une profondeur moyenne de 0,9 m (Burnez et Louboutin, 2000). En revanche, certaines tranchées de palissade plus au sud, visibles sur la carte du gradient magnétique (fig. 11) comme les tranchées P en arrière du fossé F7 et F8, ne sont pas associées

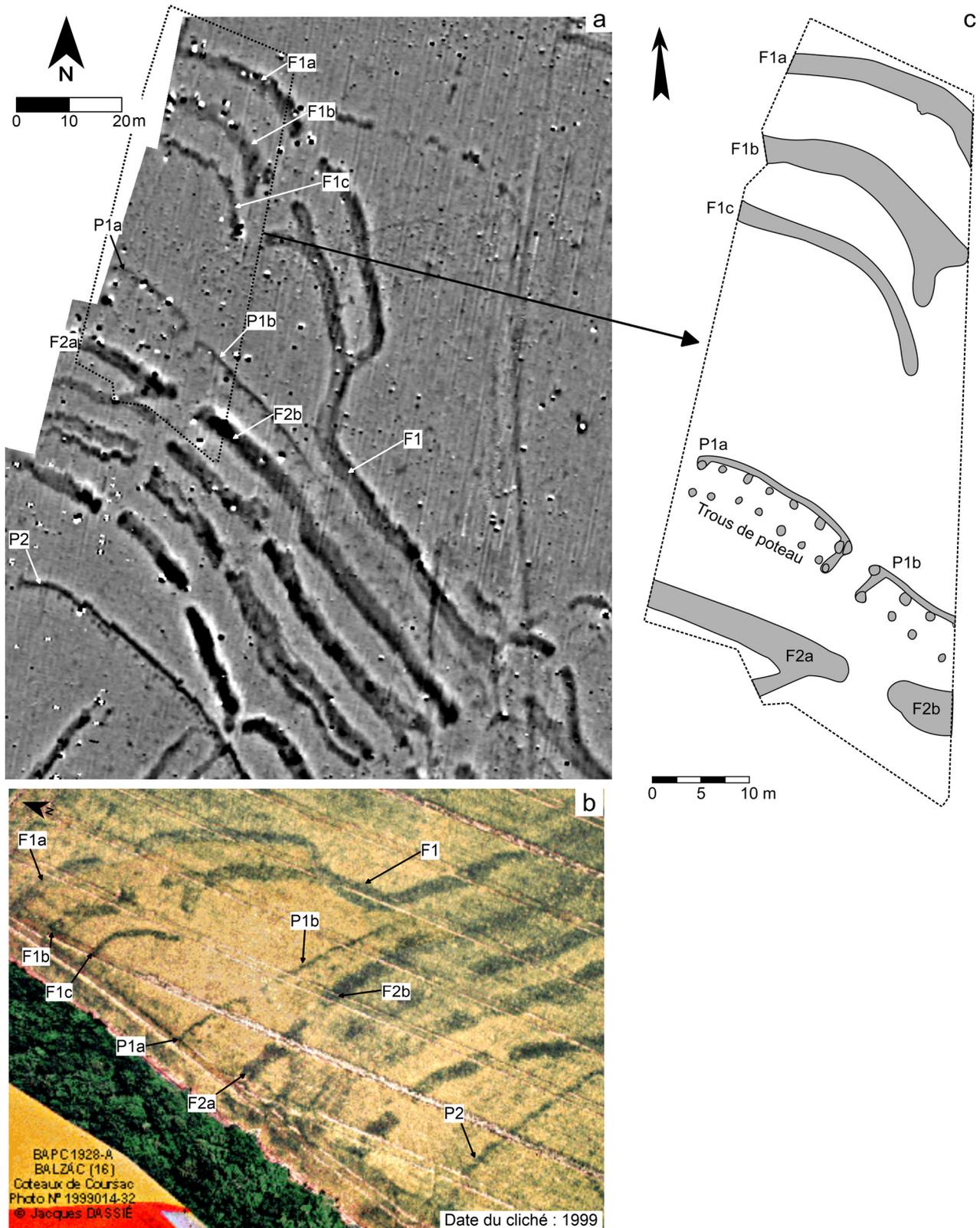


Fig. 12 – Les Coteaux de Coursac à Balzac (Charente). Extrait de la partie nord de l'enceinte : **a**, carte des anomalies magnétiques et localisation de la zone fouillée en 2000 et 2001 (d'après Burnez et Louboutin, 2002) ; **b**, photographie aérienne de la partie nord du site ; **c**, plan des structures fossoyées repérées lors des fouilles de 2000 et 2001 (d'après Burnez et Louboutin, 2002).

Fig. 12 – Les Coteaux de Coursac at Balzac (Charente), the northern part of the enclosure: **a**, map of the magnetic anomalies and location of the area excavated in 2000 and 2001 (from Burnez and Louboutin, 2002); **b**, aerial photo of the northern part of the site; **c**, plan of the ditched features identified during the 2000 and 2001 excavations (from Burnez and Louboutin, 2002).

à des contrastes dans la végétation (fig. 9). Sur la carte des anomalies magnétiques (fig. 10), ces tranchées possèdent une largeur estimée de 0,5 à 0,7 m (la taille d'une anomalie est plus grande que la structure elle-même et elle est d'autant plus grande que son intensité est élevée). Il serait envisageable que des structures fossoyées inférieures à une largeur de 0,7 m soient insuffisantes pour influencer le stress hydrique. Il est à noter que cette largeur limite n'est valable que pour des sites avec un substrat et une épaisseur de sol proches de ceux des Coteaux de Coursac.

En conclusion, même si certaines photographies aériennes peuvent être de très bonne qualité et très informatives, les cartes des anomalies magnétiques apportent plus d'informations sur l'architecture des enceintes, hormis sur des substrats sableux et graveleux épais ou des sols hydromorphes où la prospection géomagnétique est peu efficace.

Dynamique du signal

Les cartes des anomalies magnétiques fournissent des plans plus détaillés des enceintes fossoyées que les photographies aériennes qu'elles permettent de compléter (nombre de segments de fossé, aménagements d'entrées, tranchées de palissade...). Un autre apport de ce type de prospection géophysique est la dynamique du signal des fossés. Cette dynamique provient directement des propriétés physiques des matériaux qui comblent les fossés, comme cela a été montré sur le site de Bellevue à Chenomet (Ard *et al.*, 2015). Sur cette enceinte (fig. 13a), le fossé interne est plus magnétique que le fossé externe. Le comblement du fossé interne est caractérisé par des matériaux fins plus noirs avec une aimantation plus élevée que le sol naturel et avec des blocs de calcaires épars. Les propriétés magnétiques du fossé interne proviennent des matériaux composant son comblement tels que des céramiques, des résidus de foyers, des fragments d'os et de sols brûlés et de la matière organique. Les processus de dégradation de la matière organique (Leborgne, 1955 ; Faßbinder et Stanjek, 1993) et les transformations thermiques des matériaux, par l'action du feu (Le Borgne, 1960), favorisent le développement des minéraux magnétiques. Ceci contribue à leurs enrichissements dans le fossé et à une plus forte intensité de ce dernier, devenant décelable en prospection. En revanche, le fossé externe est comblé par des blocs calcaires, sans matrice, avec, en bordure du fossé, des matériaux fins plus noirs et plus magnétiques déposés par colluvionnement. Cela entraîne une variation du signal avec une intensité plus élevée sur les bordures (matériaux fins) et plus faible au centre (blocs calcaires). Cette différence dans le comblement entre les deux fossés répond aussi à une fonction et une durée d'ouverture différentes : le fossé externe a été comblé, par des blocs calcaires, plus rapidement que le fossé interne dont le comblement montre qu'il servait de décharge et de zone de rejet liées aux activités anthropiques (Ard *et al.*, 2015).

De façon analogue à ce qui a été noté sur l'enceinte de Bellevue (fig. 13a), les coupes des fossés aux Coteaux de

Coursac à Balzac montrent des variations du comblement qui se corrélaient bien avec les dynamiques du signal des fossés (fig. 13b ; Burnez et Louboutin, 2000). Le fossé F4 (qui correspond au fossé F2 du plan issu de la prospection) a des valeurs plus élevées (5 nT/m) que les fossés F3 et F2 (qui correspondent à l'ensemble de fossés F1 du plan issu de la prospection) qui ont une intensité de 3 et 1 nT/m respectivement. Sur la coupe du fossé F4, la partie nord du fond du fossé est comblée par des blocs calcaires, tandis que dans la partie sud et en surface, le comblement est constitué par des matériaux fins plus sombres et certainement plus magnétiques. Les fossés F3 et F2 sont, à l'inverse, principalement comblés par des blocs de calcaires avec une matrice probablement peu magnétique, de couleur ocre-brun (couleur proche des sols développés sur un substrat calcaire).

La prospection géomagnétique apporte donc également des informations sur les variations du comblement des fossés. Dans certains cas, beaucoup plus rares, des photographies aériennes apportent aussi cette information au travers de variations de couleur des indices phytologiques. Ceci est le cas pour les photographies aériennes de 1997 et 2009 du site de Bellevue à Chenomet (fig. 14). Sur les photographies de Bellevue, le fossé interne correspond à une marque de végétation de couleur sombre et homogène. Le fossé externe est caractérisé par une marque avec une bande de couleur claire cernée par deux bandes sombres. Ces indices phytologiques des fossés de Bellevue sont qualitativement proches des observations faites sur la carte des anomalies magnétiques (fig. 13a et 14). Sur ce site (fig. 14), les photographies aériennes de 1997 et 2009 traduisent l'hétérogénéité des complements des fossés. Néanmoins, cette observation n'a pu être correctement interprétée qu'après la prospection géophysique et la fouille. En effet, les deux bandes sombres sur les photographies de 1997 et de 2009 étaient initialement interprétées comme une double palissade. La confrontation entre les données de la géophysique et de la fouille avec la photographie aérienne permet de mettre en évidence, sur le site de Bellevue, que la réponse phytologique peut traduire une hétérogénéité du comblement du fossé.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La prospection aérienne et la prospection géomagnétique sont des méthodes complémentaires pour l'étude de l'architecture des sites ceinturés du Néolithique. La majorité des sites sont découverts par prospection aérienne et les photographies sont les premières sources d'information pour dresser les plans des fossés. Ces plans sont réalisés à partir du relevé des indices phytologiques des fossés dont les apparitions sont régies par de nombreux facteurs, ce qui rend difficilement prévisible le phénomène de ces marques dans les cultures qui ont une répétabilité non-constante suivant les années. De plus, selon les substrats géologiques, les indices

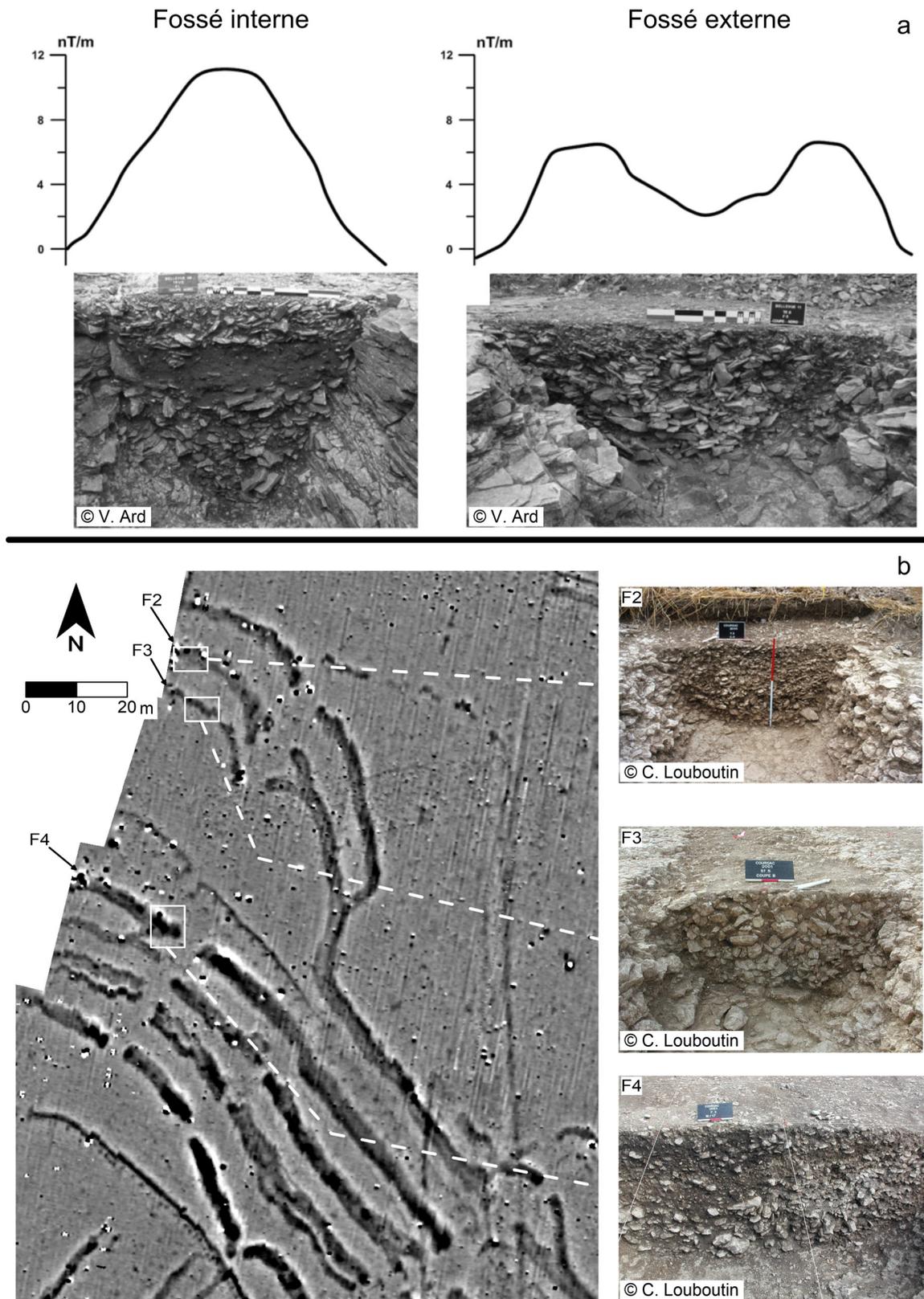


Fig. 13 – Les Coteaux de Coursac à Balzac (Charente). Extrait de la partie nord de l’enceinte : **a**, carte des anomalies magnétiques et localisation de la zone fouillée en 2000 et 2001 (d’après Burnez et Louboutin, 2002) ; **b**, photographie aérienne de la partie nord du site ; **c**, plan des structures fossoyées repérées lors des fouilles de 2000 et 2001 (d’après Burnez et Louboutin, 2002).

Fig. 13 – Les Coteaux de Coursac at Balzac (Charente). Extract from the northern part of the enclosure : **a**, map of the magnetic anomalies and location of the area excavated in 2000 and 2001 (from Burnez and Louboutin, 2002) ; **b**, aerial photograph of the northern part of the site ; **c**, plan of the ditched structures identified during the 2000 and 2001 excavations (from Burnez and Louboutin, 2002).

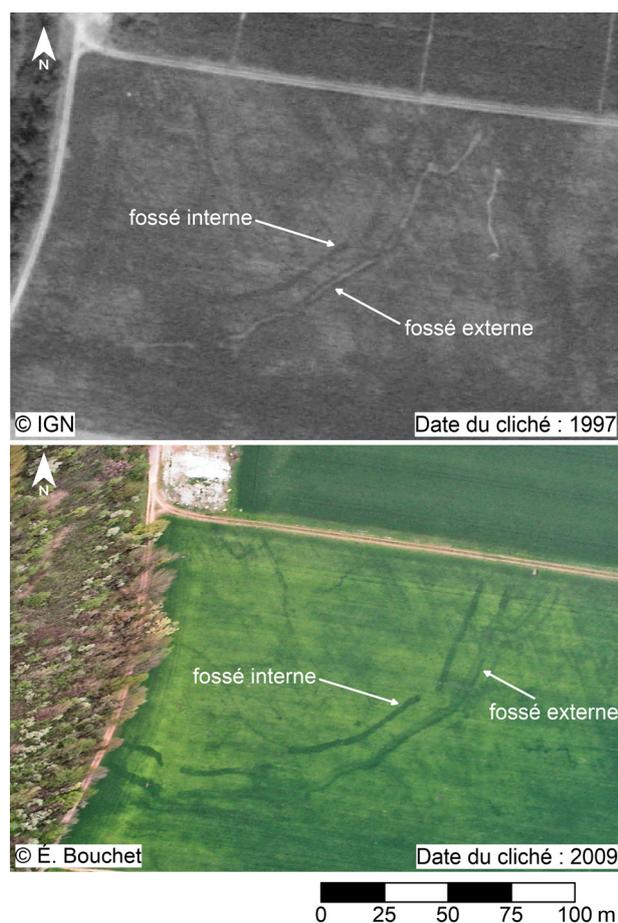


Fig. 14 – Bellevue à Chenommet (Charente). Photographies aériennes de 1997 (couleur noir et blanc originelle) et de 2009 (orthorectifiée par B. Bréjeon). Les clichés montrent des différences de teintes de gris (1997) et de vert (2009) entre le fossé interne et externe de l'enceinte, en corrélation avec le comblement des fossés et le signal magnétique des fossés.

Fig. 14 – Bellevue at Chenommet (Charente). Aerial photo from 1997 (original black and white colour) and from 2009 (orthorectified by B. Bréjeon). The photos show differences in the shades of grey (1997) and green (2009) between the inner and outer ditch of the enclosure, correlating with the fill of the ditches and their magnetic signal.

phytographiques des fossés ne sont pas toujours clairement identifiables et ne permettent pas de percevoir la totalité de l'architecture de l'enceinte. Enfin, les photographies aériennes des enceintes sont majoritairement obliques et distordent distances et longueurs. L'orthorectification peut pallier ce problème mais elle est rarement effectuée sur les photographies acquises par des prospecteurs bénévoles.

La prospection géomagnétique est une méthode alternative et complémentaire de la prospection aérienne pour remédier aux différents problèmes énoncés. Une fois l'enceinte découverte, par photographie aérienne ou autrement (prospection pédestre, fouille ancienne...), la prospection est réalisable sans contrainte particulière, hormis l'accès aux parcelles suivant le calendrier agricole et les autorisations des propriétaires et de l'administration. Elle offre des informations qui sont intéressantes en

elles-mêmes et qui peuvent également guider les choix stratégiques de la fouille.

1/ Le plan de l'enceinte obtenue par méthode géomagnétique est complet en une seule prospection alors que plusieurs campagnes de photographie aérienne sont nécessaires pour obtenir un plan de moins bonne qualité. Concernant le temps d'acquisition d'une image, la prospection aérienne est quasiment instantanée quand les conditions optimales d'apparition des indices phytologiques, si le temps de vol et les préparatifs ne sont pas pris en compte. Pour la prospection géomagnétique, le temps d'acquisition est plus long et dépend de l'instrument avec une moyenne de 2 ha/jour avec un gradiomètre à quatre capteurs (0,5 m espacement) à 1 ha/jour avec un magnétomètre en champ total. Cependant, elle est indépendante des conditions hydriques du sol et donc de la saison. De plus, une fois la carte produite, l'information est pérenne. Le temps d'acquisition peut encore être réduit avec des dispositifs motorisés avec un rendement de plus de 20 ha/jour.

2/ La prospection géomagnétique est plus pertinente que la photographie aérienne pour cartographier les petites structures fossoyées telles que les aménagements d'entrées, les tranchées de palissade et les trous de poteau. Néanmoins, cette méthode ne permet pas de détecter et de cartographier toutes ces petites structures. Ce qui est en cause, probablement, est une résolution encore trop basse des protocoles utilisés. À noter, que même en utilisant un protocole de prospection à plus haute résolution, la fouille reste indispensable pour identifier et caractériser les structures archéologiques.

3/ la cartographie géomagnétique de l'espace interne des enceintes peut permettre la découverte de structures internes, comme sur le site du Peu à Charmé où des trous de poteau appartenant à quatre bâtiments quadrangulaires ont été identifiés (Ard, Aoustin *et al.*, 2016a ; Ard *et al.*, 2018). Pour les grands bâtiments sur poteaux tels les types Antran, ils peuvent être visibles en indice phytologique sur les photographies aériennes, comme ceux aux Choffaux à Louresse-Rochemenier (Courty *et al.*, 2016) ou au Camp à Challignac (Burnez *et al.*, 1995 ; Louboutin, 2014), du fait des diamètres importantes des trous de poteau.

4/ Les contrastes d'aimantation entre les fossés et leur encaissant sont souvent bien marqués en fonction de leurs comblements, rendant les fossés clairement identifiables.

5/ Les variations du signal magnétique des fossés traduisent aussi l'hétérogénéité des comblements, comme cela a été montré sur le site de Bellevue à Chenommet (Ard *et al.*, 2015) et peut être inféré sur le site des Coteaux de Coursac à Balzac.

Certains sites ceinturés du Néolithique ne présentent pas de contraste de végétation bien que situés sur des sols propices, et ce même après plusieurs décennies de couverture aérienne. Les prospections géomagnétiques motorisées réalisées sur de grandes surfaces (plus de 100 hectares), comme celles effectuées à Stonehenge (Gaffney *et al.*, 2012), permettent de découvrir de nouveaux sites. Dans le Centre-Ouest de la France, des prospections de

cette ampleur ont réalisées autour des nécropoles néolithiques de Tusson et de Fontenille (Charente) dans le cadre de l'ANR MONUMEN. Elles ont permis de découvrir deux nouvelles enceintes, à la Folatière à Fontenille et l'Avenaude à Charmé. Ces enceintes n'ont jamais été vues en photographie aérienne (Ard, 2020 ; Ard *et al.*, 2021). Dans d'autres cas, des sites sont connus par des prospections pédestres et des fouilles n'ont rien donné en photographie aérienne ou n'ont jamais été survolés. Tel est le cas de la Garenne à Saint-Hippolyte, fouillé en 1936 et 1963 (Burgaud, 1937 ; Gabet et Massaud, 1965), sur lequel une prospection géomagnétique autour de la zone anciennement fouillée a permis de mettre en évidence la présence d'une enceinte fossoyée du Néolithique (Mathé et Ard, 2015).

L'influence des formations superficielles sur les conditions d'apparition des contrastes de végétation n'a pas été débattue ici, hormis pour les alluvions anciennes. Les cartes géologiques et les données disponibles (rapports de fouille, données de la Banque du Sous-Sol du BRGM...) ne décrivent pas du tout ou pas en détail ces affleurements. Certaines fouilles en font mention comme les fouilles sur l'enceinte des Loups à Échiré (Deux-Sèvres ; Burnez *et al.*, 1996) et du Peu à Charmé (Charente ; Ard, 2016). Cependant, l'objectif de cette étude est d'apporter une vision synthétique et globale sur l'apparition et la qualité des indices phytographiques suivant la nature du substrat. Le site du Peu à Charmé est un bon exemple pour l'étude de l'influence des formations superficielles sur l'apparition des contrastes de végétation et le lien avec la dynamique du signal. Plusieurs campagnes d'études archéologiques, géomorphologiques, micromorphologiques et géophysiques y ont été réalisées et feront l'objet de publications plus détaillées.

Pour conclure, les prospections géomagnétiques motorisées offrent de nouvelles perspectives, en permettant de cartographier rapidement l'intérieur mais également les alentours des enceintes pour rechercher d'éventuelles structures en lien avec leurs occupations. Sur le site du Peu à Charmé, des trous de poteau appartenant à au moins deux nouveaux bâtiments quadrangulaires, situés à plus de 70 m à l'extérieur de l'enceinte, ont pu être identifiés et seront sondés lors des prochaines campagnes de fouille (Ard *et al.*, 2021 ; Ard, 2020).

Remerciements. Ce travail de publication bénéficie du financement de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-17-CE27-0009-01) et regroupe une trentaine de chercheurs autour des laboratoires UMR 5608 TRACES (Toulouse) et UMR 7266 LIENSs (La Rochelle). Les opérations de terrains ont été financées par l'ANR MONUMEN (ANR-17-CE27-0009-01) et par

les programmes collectifs de recherche « Monumentalismes et territoires au Néolithique entre Loire et Charente : formes et environnements des mégalithes et des enceintes » (dir. Vincent Ard) et « Dynamiques d'occupation et d'exploitation du sel dans les golfes charentais, du Néolithique à l'âge du Fer » (dir. Vivien Mathé). Les opérations de terrain ont été soutenues par les services régionaux de l'archéologie de la DRAC Nouvelle-Aquitaine et Pays-de-la-Loire et différentes collectivités territoriales. Nous tenons à remercier tout particulièrement les propriétaires des terrains prospectés et des sites. Nous remercions les deux relecteurs pour leurs avis et les corrections proposées pour améliorer ce travail.

NOTES

- (1) Le terme anglais *cropmark* désigne les indices phytologiques/phytographiques formés par une croissance des cultures (principalement de céréales) au-dessus des structures archéologiques différente de celle au-dessus des sols naturels. Les indices phytologiques sont des empreintes de structures dans les cultures ou les prairies. Les empreintes de structure sont de plusieurs types, les indices phytologiques, les indices hydrographiques (liés aux variations d'humidité entre la structure et son encaissant) et les indices topographiques (liés au microrelief formé par les structures).
- (2) *Global Navigation Satellite System* (« Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites »).
- (3) Les enceintes répertoriées dans le Centre-Ouest de la France ont été vérifiées et inventoriées dans une base de données constituée dans le cadre de la thèse de doctorat de Victor Legrand (UMR 5608 TRACES, Université de Toulouse-Jean Jaurès) et de l'ANR MONUMEN.
- (4) Les enceintes de la Folatière à Fontenille (Charente) et de l'Avenaude à Charmé (Charente) ont été découvertes lors des prospections géomagnétiques motorisées autour des nécropoles néolithiques de Tusson et de Fontenille (Charente). Ces prospections ont été réalisées dans le cadre de l'ANR MONUMEN (dir. Vincent Ard et Vivien Mathé) et dirigées par Friedrich Lüth (DAI : *Deutsches Archäologisches Institut*).
- (5) L'enceinte de la Garenne à Saint-Hippolyte, connue par les fouilles de sauvetage de 1932 (Burgaud, 1937) et de 1963 (Gabet et Massaud, 1965), a été découverte par une prospection géomagnétique réalisée en 2015 autour des zones anciennement fouillées pour vérifier la présence de fossés. Cette prospection a été réalisée dans le cadre du PCR « Dynamique d'occupation et d'exploitation du sel dans les golfes charentais, du Néolithique à l'âge du Fer » (dir. Vivien Mathé) et la thèse de doctorat de Guillaume Bruniaux (Bruniaux, 2017).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGAPIOU A., HADJIMITSIS D.G., SARRIS A., GEORGOPOULOS A., ALEXAKIS D.D. (2013) – Optimum temporal and spectral window for monitoring crop marks over archaeological remains in the Mediterranean region, *Journal of Archaeological Science*, 40, 3, p. 1479-1492.
- AGAPIOU A., LYSANDROU V., LASAPONARA R., MASINI N., HADJIMITSIS D. (2016) – Study of the Variations of Archaeological Marks at Neolithic Site of Lucera, Italy Using High-Resolution Multispectral Datasets, *Remote Sensing*, 8, 9, p. 723-737.
- ARD V. (2016) – *Le Nord-Charente au Néolithique moyen et récent : enceintes fossoyées, sépultures mégalithiques et territoires (4500-2900 av. J.-C.)*, rapport final de PCR, V. Ard (dir.), service régional de l'archéologie, Poitiers, 466 p.
- ARD V. (2020) – *Monumentalismes et territoires au Néolithique entre Loire et Charente : Formes et environnements des mégalithes et des enceintes*, rapport intermédiaire de PCR, V. Ard (dir.), service régional de l'Archéologie, Poitiers, 314 p.
- ARD V., Aoustin D., BOUCHET É., CAMUS A., CARRÈRE I., CHARRIEU L., GALIN W., GRANAI S., JADEAU F., JEAUFREAU V., LEGRAND V., LE JEUNE Y., LEROUX V.-E., LEVEQUE F., MATHÉ V., MENS E., ONFRAY M., PAPON J., PILLOT L., PONCET D. (2016b) – *Projet Collectif de Recherche (2013-2015) : Le Nord-Charente au Néolithique moyen et récent : enceintes fossoyées, sépultures mégalithiques et territoires (4500-2900 av. J.-C.)*, inclus les résultats des fouilles des dolmens de la Motte de la Jacquille et de l'enceinte du Peu à Charmé (Charente), Rapport final 2015, DRAC-SRA Poitou-Charentes, Poitiers, 466 p.
- ARD V., Aoustin D., MATHÉ V., ONFRAY M., LEGRAND V., BOUCHET É. (2016a) – Découverte d'un habitat ceinturé du début du Néolithique moyen dans le Centre-Ouest de la France : Le Peu à Charmé (Charente), *Bulletin de la Société préhistorique française*, 113, 2, p. 382-385.
- ARD V., BOUCHET É., BRÉCHARD S., DONNART K., FOUÉRE P., PAPON J. (2012) – Une enceinte à fossés interrompus de la culture Matignons sur le haut cours de la Charente : Bellevue à Chenommet (Charente). Objectifs, stratégie et premiers résultats des campagnes 2008 à 2010, in T. Perrin, I. Sénépart, J. Cauliez, É. Thirault, S. Bonnardin (dir.), *Dynamismes et rythmes évolutifs des sociétés de la Préhistoire récentes*, *Actualité de la recherche, Actes des 9^e RMPR (Saint-Georges-de-Didonne, 8-9 octobre 2010)*, Archives d'Écologie Préhistorique, Toulouse, p. 117-134.
- ARD V., MATHÉ V., LÉVÊQUE F., CAMUS A. (2015) – A Comprehensive Magnetic Survey of a Neolithic Causewayed Enclosure in West-central France for the Interpretation of Archaeological Features: Comprehensive Magnetic Survey of a Neolithic Causewayed Enclosure, *Archaeological Prospection*, 22, 1, p. 21-32.
- ARD V., MATHÉ V., ONFRAY M., CAMUS A., LÉVÊQUE F., LEGRAND V. (2018) – Nouvelles données sur les enceintes du Néolithique moyen et récent du Centre-Ouest de la France : l'exemple du haut cours de la Charente, in M. Gandelin, V. Ard, J. Vaquer, L. Jallot (dir.), *Les sites ceinturés de la Préhistoire récente : nouvelles données, nouvelles approches, nouvelles hypothèses*, Carcassonne, Archives d'Écologie Préhistorique, p. 87-108.
- ARD V., GANDELIN M., LEGRAND V. (2019) – Les enceintes fossoyées néolithiques de l'ouest du sud de la France : nouvelles données, nouvelles approches, in *Le phénomène des enceintes dans le Néolithique du Nord-Ouest de l'Europe*, Saint-Dié-des-Vosges, p. 17.
- ARD V., MATHÉ V., MENS E., BRUNIAUX G., LAURENT A., LEGRAND V., LÜTH F., POIRIER N. (2021) – Pour une approche multi-scalaires et multi-méthodes du monumentalisme néolithique. L'exemple du programme ANR MONUMEN, in V. Ard, E. Mens, M. Gandelin (dir.), *Mégalithismes et monumentalismes funéraires : passé, présent, futur*, Leiden, Sidestone, p. 9-27.
- BARANOV V., NAUDY H. (1964) – Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole, *Geophysics*, 29, 1, p. 67-79.
- BOURGUEIL B., HANZTPEGUE P., MOREAU P. (1986) – *Feuille de Matha [684], Notice explicative*, Carte géologique de la France au 50000^e, BRGM, Orléans, 24 p.
- BOURGUEIL B., MOREAU P., GABET C., L'HOMER A., VOUBE J. (1972) – *Feuille de Rochefort [680], Notice explicative*, Carte géologique de la France au 50000^e, BRGM, Orléans, 31 p.
- BRUNIAUX G. (2017) – *Reconstitution paléogéographique et prospection archéologique en zone littorale par approches géophysiques multi-méthodes et multi-échelles*, thèse de doctorat, UMR 7266 LIENSs, Université de La Rochelle-CNRS, La Rochelle, 364 p.
- BRUNIAUX G., MATHÉ V., LÉVÊQUE F., ARD V., CAMUS A. (2016) – Prospections géophysiques sur le site néolithique du Pontet (Saint-Nazaire-sur-Charente, Charente-Maritime), in P. Marticorena, V. Ard, A. Hasler, J. Cauliez, C. Gilibert, I. Sénépart (dir.), « *Entre deux mers* » et actualité de la recherche, Bayonne, p. 181-186.
- BRUNIAUX G., MATHÉ V., LÉVÊQUE F., CAMUS A., ARD V. (2017) – Data processing chain to high spatial resolution magnetic survey: application on the Neolithic site of Le Pontet (Charente-Maritime, France), *Archaeological Prospection*, 24, 3, p. 1-14.
- BURGAUD P. (1937) – Un fond de cabane néolithique à la Garenne (Charente-Inférieure), *Bulletin de la Société préhistorique française*, 34, 2, p. 132-140.
- BURNEZ C. (1992) – Font-Blanche à Saint-Eugène (Charente-Maritime), *Bulletin de l'Association archéologique et historique Jonzacaise*, 39.
- BURNEZ C., CASE H. (1966) – Les camps néolithiques des Matignons à Juillac-le-Coq (Charente), *Gallia Préhistoire*, 9, 1, p. 131-245.
- BURNEZ C., FAÇON R. (1957) – Le Terrier de Biard (Commune de Segonzac, Charente), *Bulletin de la Société préhistorique de France*, 54, 11-12, p. 770-775.
- BURNEZ C., HESSE A. (1967) – Prospections géophysiques sur les sites archéologiques de la Charente, *Bulletin de la Société préhistorique française*, 64, 2, p. 299-304.

- BURNEZ C., LOUBOUTIN C. (1999) – Les enceintes fossoyées néolithiques : architecture et fonction : l'exemple du Bassin inférieur et moyen de la Charente, *Bulletin de la Société préhistorique française*, 96, 3, p. 329-352.
- BURNEZ C., LOUBOUTIN C. (2000) – *Les Coteaux de Coursac, Balzac (Charente)*, Rapport de fouille programmée annuelle 2000, C. Louboutin (Musée des Antiquités nationales), service régionale de l'Archéologie, Poitiers, 82 p.
- BURNEZ C., LOUBOUTIN C. (2002) – Les Coteaux de Coursac à Balzac (Charente), un habitat Vienne-Charente en Angoumois, in C. Billard (dir.), *INTERNEO 4*, Saint-Germain-en-Laye, INTERNEO et Société Préhistorique Française, p. 109-117.
- BURNEZ C., FOUÉRE P., TUTARD J. (1994) – Enceintes néolithiques - La Grande Prairie, Vibrac (Charente-Maritime), *Association Archéologique et historique jonzacaise*, p. 3-82.
- BURNEZ C., DASSIÉ J., SICAUD F. (1995) – L'enceinte arténacienne du « Camp » à Challignac (Charente), *Bulletin de la Société préhistorique française*, 92, 4, p. 463-478.
- BURNEZ C. (dir.), BÖKÖNYI S., BOURHIS J.-R., CAMUZART J.-P., CONVERTINI F., CORILLION A., FONTUGNE M., FOUÉRE P., GRUET M., GYULAI F., LIMONDIN N., MARAMBAT L., SEMELIER P., SANTALLIER D., VERNOU C., VUAILLAT D. (1996) – *Le site des Loups à Échiré (Deux-Sèvres)*, Musée des tumulus de Bougon, 235 p.
- CAMUS A., MATHÉ V., LÉVÊQUE F., LOUBOUTIN C. (2014). *Travaux de prospections magnétiques sur le site néolithique du Camp de Challignac (Charente)*, Rapport de prospection géophysique, A. Camus et V. Mathé (dir.), Service régional de l'archéologie, Poitiers, 37 p.
- CARIOU E., COIRIER B., DUPUIS J., GABILLY J. (1983) – *Feuille de Niort [610]*, Notice explicative, Carte géologique de la France au 50000^e, BRGM, Orléans, 34 p.
- CARIOU E., GABILLY J., COIRIER B. (1973) – *Feuille de Ruffec [661]*, Notice explicative, Carte géologique de la France au 50000^e, BRGM, Orléans, 11 p.
- CHAMPÊME L.-M. (1999) – Enceintes à fossés de barrage dans le bassin du Thouet (Deux-Sèvres), *Bulletin de la Société préhistorique française*, 96, 3, p. 353-358.
- CIMINALE M., LODDO M. (2001) – Aspects of magnetic data processing, *Archaeological Prospection*, 8, 4, p. 239-246.
- COURTY H., FROMONT N., LEROUX G., FILLON D., FORRÉ P., ARD V. (2016) – Un nouveau bâtiment de type Antran en Centre-Ouest : présentation préliminaire du site des « Chofaux » à Louresse-Rochemenier (Maine-et-Loire), in *Inter-Néo II*, Saint-Germain-en-Laye, France, Association pour les Études Interrégionales sur le Néolithique (INTERNEO) et Société Préhistorique Française, p. 179-188.
- CRAWFORD O.G.S., KEILLER A. (1928) – *Wessex from the air*, Clarendon Press, Oxford, 263 p.
- DASSIÉ J. (2001) – *Archéologie aérienne, Patrimoine archéologiques et touristique des Charentes*, Joué-lès-Tours, éd. Alan Sutton (Histoire et Archéologie), 160 p.
- DONEUS M., EDER-HINTERLEITNER A., NEUBAUER W. (1998) – Archaeological prospection in Austria, in M. Doneus, A. Eder-Hinterleitner, W. Neubauer (dir.), *Archaeological Prospection*, Vienne, (Austrian Academy of Sciences), p. 11-59.
- ESCHASSÉRIAUX E. (1884) – Le Camp néolithique de Peu-Richard, *Bulletin de la Société des archives historiques de la Saintonge et de l'Aunis*, p. 191.
- EDER-HINTERLEITNER A., NEUBAUER W., MELICHAR P. (1996) – Restoring Magnetic Anomalies, *Archaeological Prospection*, 3, p. 185-197.
- FASSBINDER J.W.E., STANJEK H. (1993) – Occurrence of bacterial magnetite in soils from archaeological sites, *Archaeologia Polona*, 31, p. 117-128.
- FASSBINDER J.W.E., STANJEK H., HOJATOLLAH V. (1990) – Occurrence of magnetic bacteria in soil, *Nature*, 343, p. 161-162.
- FEATHERSTONE R. (1999) – The Royal Commission on the Historical Monuments of England, Co-Ordinating aerial reconnaissance in England, *Revue archéologique de Picardie*, n° spécial 17, p. 173-177.
- GABET, MASSAUD J. (1965) – Le gisement Peu-Richardien de La Garenne 2, commune de Saint-Hippolyte (Charitime-Maritime), *Bulletin de la Société préhistorique française*, 62, 1, p. 159-196.
- GAFFNEY C., GAFFNEY V., NEUBAUER W., BALDWIN E., CHAPMAN H., GARWOOD P., MOULDEN H., SPARROW T., BATES R., LÖCKER K., HINTERLEITNER A., TRINKS I., NAU E., ZITZ T., FLOERY S., VERHOEVEN G., DONEUS M. (2012) – The Stonehenge Hidden Landscapes Project, *Archaeological Prospection*, 19, 2, p. 147-155.
- GALLO D., CIMINALE M., BECKER H., MASINI N. (2009) – Remote sensing techniques for reconstructing a vast Neolithic settlement in Southern Italy, *Journal of Archaeological Science*, 36, 1, p. 43-50.
- GHESSQUIÈRE E., GIAZZON D., MARCIGNY C., BARBIER-PAIN D., HULIN G. (2011) – L'enceinte Néolithique moyen de Goulet « Le Mont » (Orne) dans son contexte environnemental, *Revue archéologique de Picardie, numéro spécial*, 28, 1, p. 183-205.
- GLASER B., BIRK J.J. (2012) – State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Indio), *Geochimica et Cosmochimica acta*, 82, p. 39-51.
- HALE D., COWLEY D.C. (2009) – Appendix 1: Cropmark evidence and geophysical survey: a comparison of results from sites investigated by the TLEP, in *The Traprain Law Environs Projets, Fieldwork and excavations 2000-2004*, Edinburgh, Royaumes-Unis, Colin Haselgrove, p. 239-258.
- HAMON T., HULIN G. (2011) – Les bâtiments du Néolithique final des Vaux à Moulins-sur-Céphons (Indre) et les apports de la prospection géophysique, in F. Bostyn, E. Martial, I.raud (dir.), *Le Néolithique de la France dans son contexte européen : habitat et économie aux 4^e et 3^e millénaires avant notre ère*, Villeneuve d'Ascq, p. 437-449.
- HANZTPEGUE P., BONNIN J., CARIOU E., GOMEZ DE SOTO J., MOREAU P. (1984) – *Feuille de Mansle [685]*, Notice explicative, Carte géologique de la France au 50000^e, BRGM, Orléans, 23 p.
- HASEK V., KOVARNIK J. (1999) – Aerial and Geophysical Prospection in Archaeological Research of Prehistoric Circular Ditches in Moravia, *Archaeological Prospection*, 6, p. 187-209.

- JOUBERT J.-M., THIÉBLEMONT D., KARNAY G., WYNS R., PONCET D. (2000) – *Feuille de Montreuil-Bellay [512], Notice explicative*, Carte géologique de la France au 50000^e, BRGM, Orléans, 110 p.
- JOUSSAUME R. (1982) – *Champ-Durand à Nieul/l'Autize (Vendée). Site préhistorique fortifié du III^e millénaire av. J.-C.*, Groupe Vendéen d'Études Préhistoriques, La Roche-sur-Yon, 18 p.
- JOUSSAUME R. (1995) – Les enceintes néolithiques du Centre-Ouest de la France, *Groupe vendéen d'Études préhistoriques*, 31, p. 25-31.
- JOUSSAUME R. (1999) – À propos de l'enceinte fossoyée de Champ-Durand à Nieul-sur-l'Autize (Vendée), *Bulletin de la Société préhistorique française*, 96, 3, p. 401-408.
- JOUSSAUME R., BURNEZ C. (1996) – Enceintes néolithiques. La Grande Prairie à Vibrac (Charente-Maritime), *Bulletin de la Société préhistorique française*, 93, 3, p. 260-261.
- KOBYLIŃSKI Z., MISIEWICZ K. (2002) – Geophysical verification of aerial discoveries of archaeological sites: examples from Poland, in *Aerial Archaeology: Developing Future Practice*, Amsterdam, Hollande, IOS Press (coll. Life and behavioural sciences 1), p. 233-240.
- KŘIVÁNEK R. (2017) – Comparison study to the use of geophysical methods at archaeological sites observed by various remote sensing techniques in the Czech Republic, *Geosciences*, 7, 81, p. 1-14.
- KŘIVÁNEK R. (2006) – Magnetometric prospection of various types of large ditched enclosures in Bohemia, *Archaeological Prospection*, 13, 1, p. 25-43.
- LE BORGNE E. (1955) – Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel, *Annales de Géophysique*, 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*, 16, p. 159-196.
- LEGENDRE L., DHOSTER M., COUBÈS L. (1989) – *Feuille de Thouars [539], Notice explicative*, Carte géologique de la France au 50000^e, BRGM, Orléans, 35 p.
- LINFORD N.T. (2004) – Magnetic ghosts: mineral magnetic measurements on Roman and Anglo-Saxon graves, *Archaeological Prospection*, 11, 3, p. 167-180.
- LOUBOUTIN C. (2014) – *Challignac, le Camp, bilan scientifique de la région Poitou-Charentes 2013*, Service régional de l'Archéologie, Poitiers, p. 41-43.
- LÜCK E., EISENREICH M. (1999) – Geophysical prospection of archaeological sites in Brandenburg, Germany, *Archaeological Prospection*, 6, 3, p. 125-133.
- MAITAY C., ARD V., BAUDRY A., DANDURAND G., FOUÉRE P., LARMIGNAT B., LAURENT A., MOUTARDE B., VITTE H. (2022) – *L'enceinte néolithique et l'occupation de l'Âge du Bronze ancien vu Bras Melon à Val-d'Auge (Charente)*, *Travaux du PCR Monumentalismes et territoires au Néolithique entre Loire et Charente et de l'ANR MONUMEN*, Rapport de sondage (campagne 2021), DRAC-SRA Nouvelle-Aquitaine, Poitiers, 124 p.
- MÁRQUEZ ROMERO J.E., VALERA A.C., BECKER H., JIMÉNEZ JÁIMEZ V., SUÁREZ PADILLA J. (2011) – El Complejo Arqueológico dos Perdigoes (Reguengos de Monsaraz, Portugal). Prospecciones Geofísicas - Campañas 2008-09, *Trabajos de Prehistoria*, 68, 1, p. 175-186.
- MARSAC M., JOUSSAUME R. (1977) – Le marais poitevin aux temps néolithiques, *Archéologia*, novembre 1977, 12, p. 20-31.
- MARTINAUD M. (2004) – *Challignac (Charente) - Le Camp, prospection électrique*, rapport de prospection géophysique, M. Martinaud (dir.), service régional de l'Archéologie, Poitiers, 15 p.
- MARTINAUD M. (2005) – Prospection géophysique et sites préhistoriques, *Archéologie & Sciences des origines, dossier d'archéologie n°308 : la prospection géophysique*, 308, p. 26-34.
- MATHÉ V., ARD V. (2015) – *Dynamiques d'occupation et d'exploitation du sel dans les golfes charentais, du Néolithique à l'Âge du Fer*, rapport intermédiaire de PCR, V. Mathé et V. Ard (dir.), service régional de l'Archéologie, Poitiers, 127 p.
- MATHÉ V., LÉVÊQUE F., MATHÉ P.-E., CHEVALLIER C., PONS Y. (2006) – Soil anomaly mapping using a caesium magnetometer: Limits in the low magnetic amplitude case, *Journal of Applied Geophysics*, 58, 3, p. 202-217.
- MATHÉ V., LÉVÊQUE F., DRUEZ M., ARD V. (2012) – Qu'apporte la prospection géophysique à l'étude d'un champ néolithique ? L'exemple du site de Bellevue à Chenommet (Charente), in T. Perrin, I. Sénépart, J. Cauliez, E. Thirault, S. Bonnardin (dir.), *Dynamismes et rythmes évolutifs des sociétés de la Préhistoire récente, Actualité de la recherche, Actes des 9^e RMPR (Saint-Georges-de-Didonne, 8-9 octobre 2010)*, Toulouse, Archives d'Écologie Préhistorique, p. 135-140.
- MESSANT A., CHAFCHAFI A., DUCOMMUN C., JALABERT S., LAGACHERIE P., LEHMANN S., LEMERCIER B., MOULIN J., MURE J.-P., NORAZ A., LAROCHE B., SAUTER J. (2019) – *Pédologie, les sols dominants en France métropolitaine, descriptions des grandes familles de sols*, GisSol, RMT Sols et Territoires, 45 p.
- MORIARTY C., COWLEY D.C., WADE T., NICHOL C.J. (2019) – Deploying multispectral remote sensing for multi-temporal analysis of archaeological crop stress at Ravenshall, Fife, Scotland, *Archaeological Prospection*, 26, p. 33-46.
- NORDIGUIAN L., SALLES J.-F. (2000) – *Aux origines de l'archéologie aérienne : A. Poidebard (1878-1955)*, Beyrouth, Presses de l'Université Saint-Joseph, 242 p.
- NOWACZINSKI E., SCHUKRAFT G., HECHT S., RASSMANN K., BUBENZER O., EITEL B. (2012) – A Multimethodological Approach for the Investigation of Archaeological Ditches - Exemplified by the Early Bronze Age Settlement of Fídvár Near Vrábľa (Slovakia): Multimethodological Investigation of Archaeological Ditches, *Archaeological Prospection*, 19, 4, p. 281-295.
- OLLIVIER A. (1999) – Quelques enceintes repérées par prospection aérienne dans la moitié nord du département de la Vienne, *Bulletin de la Société préhistorique française*, 96, 3, p. 367-374.
- OVENDEN S.M., GATER J., SAUNDERS M.K. (2009) – Ten years on: Geophysical survey on the « Heart of Neolithic Orkney » World Heritage Area, in *ArchéoSciences, Revue*

d'archéométrie, Montpellier, Presses universitaires de Rennes, p. 125-127.

PAUTREAU J.-P. (1976) – L'habitat Peu-richardien de la Sauzaie (Commune de Soubise, Charente-Maritime), *Revue archéologique du Centre de la France*, 15, 3-4, p. 350.

SALISBURY R.B., BERTÓK G., BÁCSMEGI G. (2013) – Integrated Prospection Methods to Define Small-site Settlement Structure: a Case Study from Neolithic Hungary: Integrated Prospection of Neolithic Settlements, *Archaeological Prospection*, 20, 1, p. 1-10.

SCHULTZE V., LINZEN S., SCHÜLER T., CHWALA A., STOLZ R., SCHULZ M., MEYER H.-G. (2008) – Rapid and sensitive magnetometer surveys of large areas using SQUIDs – the measurement system and its application to the Niederrhein Neolithic double-ring ditch exploration, *Archaeological Prospection*, 15, 2, p. 113-131.

STANJEK H., FASSBINDER J.W.E. (1995) – Soil aspects affecting archaeological details in aerial photographs, *Archaeological Prospection*, 2, 2, p. 91-101.

Guillaume BRUNIAUX

Docteur en géophysique
Microentreprise ArchéoSolution, Solution de
prospection géophysique pour l'archéologie
58 ter avenue Edmond Grasset
17000 La Rochelle
Chercheur invité
UMRi 7266 LIENSs
CNRS/La Rochelle Université
Bât. ILE, 2 rue Olympe de Gouges
17000 La Rochelle
gbruniaux.pro@outlook.fr

Victor LEGRAND

Doctorant en archéologie
UMR 5608 TRACES
CNRS/Université de Toulouse-Jean Jaurès
Maison de la Recherche
5 allée Antonio Machado
31058 Toulouse cedex 9
victorlegrand121@gmail.com

Éric BOUCHET

Prospecteur aérien
Route d'Aigre, 16140 Tusson
ericbct@wanadoo.fr

François LÉVÊQUE

Maitre de conférences-HDR
UMRi 7266 LIENSs
CNRS/La Rochelle Université
Bât. ILE, 2 rue Olympe de Gouges
17000 La Rochelle
francois.leveque@univ-lr.fr

Catherine LOUBOUTIN

Conservateur général du patrimoine honoraire
27 Grande rue, 37350 Barrou
catherine.louboutin@free.fr

Vivien MATHÉ

Maitre de conférences-HDR
UMRi 7266 LIENSs
CNRS/La Rochelle Université
Bât. ILE, 2 rue Olympe de Gouges
17000 La Rochelle
vivien.mathe@univ-lr.fr

Vincent ARD

Chargé de recherche
UMR 5608 TRACES
CNRS/Université de Toulouse-Jean Jaurès
Maison de la Recherche
5 allée Antonio Machado
31058 Toulouse cedex 9
vincent.ard@univ-tlse2.fr