



HAL
open science

De la détection à la caractérisation géophysique sur surface décapée des sites de l'âge du Fer

François-Xavier Simon, Guillaume Hulin

► **To cite this version:**

François-Xavier Simon, Guillaume Hulin. De la détection à la caractérisation géophysique sur surface décapée des sites de l'âge du Fer : Ce que les observations de terrain nous apprennent. Les agglomérations dans le monde celtique et ses marges. Nouvelles approches et perspectives de recherche, Ausonius éditions, pp.249-262, 2023, 978-2-35613-530-8. 10.46608/nemesis1.9782356135285.13 . hal-04182857

HAL Id: hal-04182857

<https://hal.science/hal-04182857>

Submitted on 30 Sep 2023

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike 4.0 International License

DE LA DÉTECTION À LA CARACTÉRISATION GEOPHYSIQUE SUR SURFACE DÉCAPÉE DES SITES DE L'ÂGE DU FER

Ce que les observations de terrain nous apprennent

François-Xavier Simon, Guillaume Hulin

α INTRODUCTION

La géophysique est utilisée en archéologie depuis plusieurs dizaines années et les exemples illustrant l'apport de ces techniques sont maintenant assez courants. Les sites de l'âge du Fer, qu'ils soient funéraires ou d'habitat, du Premier ou du Second âge du Fer ne font pas exception à la règle. Le recours à ces techniques sur ces sites livre de nombreuses informations et fournit aux archéologues des plans qui permettent de repenser les schémas d'occupations, souvent difficiles à percevoir au travers des seules fouilles archéologiques. Pour les sites plus modestes, dont l'intérêt archéologique ne justifie pas forcément une fouille pluriannuelle extensive, les méthodes de prospection s'avèrent indispensables. La prospection aérienne ou au sol, méthodes bien connues, nécessitent cependant deux prérequis, à savoir des enfouissements relativement faibles et des conditions d'observation adéquates (état des cultures, météorologie...).

La géophysique présente quant à elle l'avantage de pouvoir être déployée avec différents outils qui peuvent à la fois s'adapter aux types de vestige recherchés mais aussi aux types de sol rencontrés. Cette large gamme de méthodes et d'outils permet de mettre en évidence un spectre étendu de vestiges archéologiques : des structures en creux (fosses, fossés) avec les méthodes magnétiques, électromagnétiques ou électriques mais aussi des structures en dur (bâtis, murs, etc.) avec la méthode électrique ou la méthode radar.

Certaines de ces techniques permettent aujourd'hui d'imager des vestiges sur plusieurs milliers de m² voire plusieurs hectares dans un temps court ce qui présente un intérêt majeur pour les études d'agglomérations protohistoriques. La méthode magnétique, aujourd'hui largement démocratisée, notamment dans son mode tracté et associée à un système GNSS, permet de couvrir jusqu'à 7 à 8 ha par jour. D'autres méthodes sont également à la disposition du géophysicien comme les systèmes tractés de mesure de résistivité électrique (Dabas *et al.* 1994 ; Dabas 2008) ou radar (Trinks *et al.* 2018). D'une mise en œuvre plus longue que la méthode magnétique et plus contraignante, il est donc nécessaire dans un premier temps de bien quantifier leur plus-value. En effet ces méthodes sont largement impactées par la nature du sol. La méthode électrique, caractérisée par une mesure volumétrique, est limitée lorsque les vestiges sont enfouis trop profondément ou que la résistivité électrique globale du sol est trop élevée. À l'inverse, la méthode radar est inopérante dès lors que la teneur en argile est trop haute ou que l'on s'intéresse à des structures en creux.

Ces choix méthodologiques peuvent être précisés quand il est possible de réaliser une phase de test avant de lancer les campagnes de prospection extensives. Cela requiert cependant que l'équipe géophysique en charge de l'étude soit équipée et avertie de l'ensemble des outils disponibles. Par ailleurs, les cas d'étude où les résultats sont peu probants sont souvent peu valorisés. De fait, il reste encore difficile d'entrevoir exhaustivement la complexité, les limites et le potentiel des méthodes géophysiques au travers des exemples impressionnants mais non représentatifs de l'ensemble du corpus des sites étudiés avec ces méthodes.

Il y a une trentaine d'années, la géophysique a commencé à être utilisée dans le cadre de l'archéologie de sauvetage (Dabas 1999 ; Ducomet & Druelle 1999) puis préventive depuis les années 2000. Dans un premier temps elle a été en grande partie présentée comme une méthode de détection permettant de substituer tout ou partie des tranchées de diagnostic. Ce point de vue, somme toute peu objectif, a freiné le développement de la géophysique en archéologie préventive créant désaccords et conflits sur les approches à adopter pour la détection des vestiges (Hulin & Simon 2020). Ce n'est que très récemment qu'elle a été progressivement intégrée dans la chaîne opératoire communément adoptée par les archéologues du préventif (Simon 2012 ; Fichet de Clairfontaine 2014 ; Hulin *et al.* 2018). Cette utilisation plus raisonnée de la géophysique s'est également avérée plus prometteuse. En comblant les lacunes rencontrées par les archéologues de terrain, la géophysique est passée d'une méthode de substitution à une méthode de reconnaissance spatiale et d'analyse complémentaire (Hulin & Simon 2020). Pour ce faire, il a fallu repenser les usages de la géophysique en archéologie. C'est d'abord lors de la fouille, directement sur surface décapée, en aide à la lecture du sol, que ces techniques se sont avérées les plus pertinentes. Des applications à large échelle permettant de repérer les paléochenaux – et donc de mieux comprendre les paléoenvironnements – ont également été mises en œuvre. L'utilisation de la géophysique dans le cadre du diagnostic n'est venue que plus tard et, dans chacun des cas, cette approche a été motivée par des raisons techniques (difficulté de réalisation des sondages en tranchée) ou scientifiques (type de site particulièrement favorable à la détection géophysique). Chacune de ces applications, grâce au dialogue avec

les archéologues, permet de repenser l'utilisation de la géophysique. Les exemples sont aujourd'hui nombreux et nous aborderons ici certaines des observations réalisées grâce aux allers-retours entre études géophysiques et fouilles archéologiques. On peut citer la question des vestiges peu visibles sur le terrain mais présentant une anomalie géophysique forte (comme par exemple le cas des aires de travail du fer) ; l'absence de contraste géophysique pour certaines structures dans des contextes *a priori* favorables (qui peut biaiser l'exhaustivité des plans d'occupation basés sur les données géophysiques) ; la présence d'un signal géophysique cohérent dans les horizons pédologiques superficiels vraisemblablement remaniés ; ou bien encore les interprétations géophysiques dont la fiabilité n'est que peu discutée. Ce dernier point étant particulièrement important dans le cas des cartographies de site qui sont potentiellement amenées à servir de support pour les synthèses plus générales (comme celles sur l'habitat de l'âge du Fer par exemple).

α MESURE SUR SURFACE DÉCAPÉE

Même si des exemples de mesures sur terrain décapée existent depuis de nombreuses décennies, ce n'est qu'au cours des années 2010 que des tentatives de systématisation en archéologie préventive ont été initiées en France (Hulin *et al.* 2012 ; Simon *et al.* 2012 ; Hulin & Jagou 2014).

L'avantage de cette approche tient dans la possibilité de réaliser des mesures géophysiques directement sur les structures et les niveaux de sol. Cela permet d'une part de limiter l'atténuation du signal physique dès lors que l'on s'éloigne de la structure étudiée mais également de réduire le bruit lié à l'hétérogénéité des horizons superficiels. Ce double constat permet ainsi d'obtenir des mesures moins bruitées et avec des amplitudes plus importantes du signal géophysique.

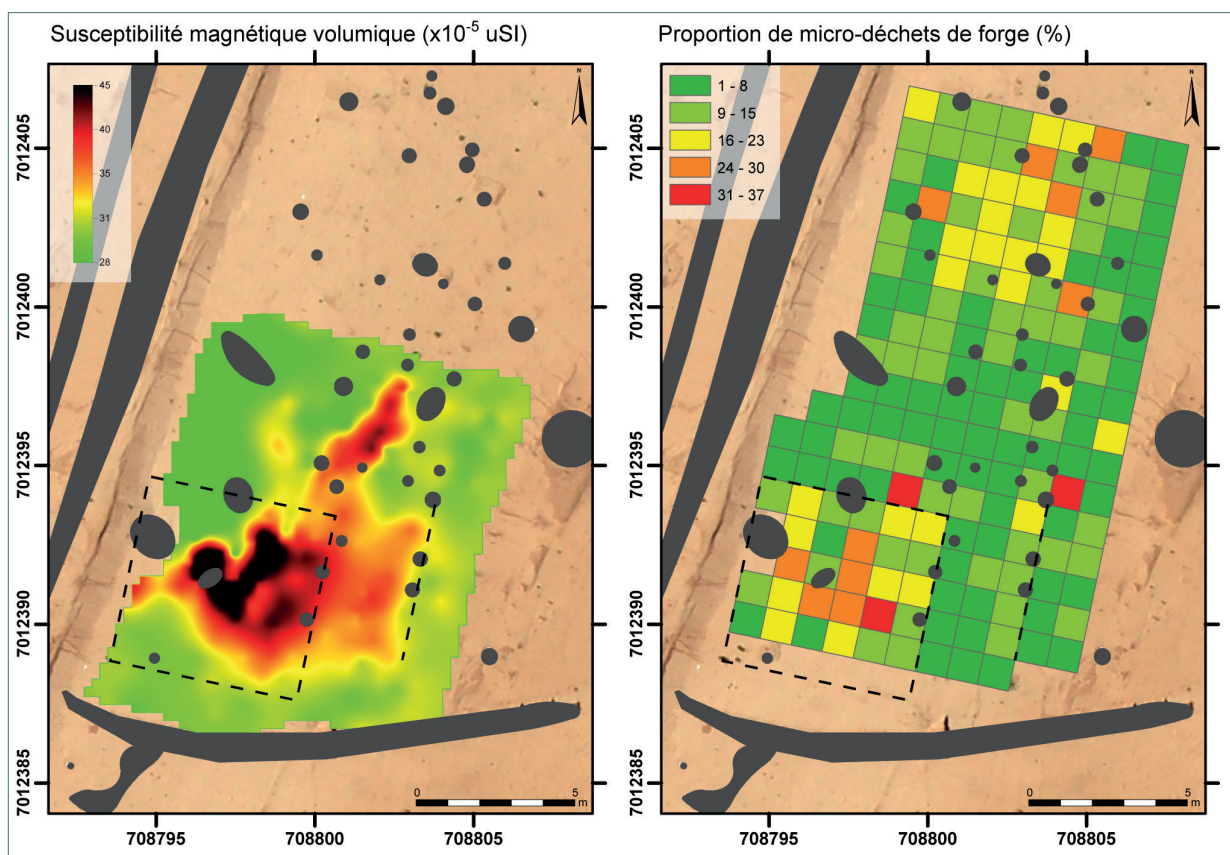
L'utilisation la plus évidente de la géophysique sur surface décapée est la caractérisation des forges et des activités en lien avec la métallurgie du fer (Hulin & Jagou 2014). L'activité de la forge entraîne la formation de microdéchets et notamment de battitures de taille milli- voire micrométrique qui se répandent autour de l'enclume lors de la frappe du fer chaud. Lorsque ces déchets sont présents en quantité faible à modérée, il peut être délicat de les repérer par la simple observation visuelle. L'emploi d'un aimant permet, dans certains cas, de faire une observation de présence/absence mais nécessite des observations visuelles préalables pour identifier les zones d'intérêt.

Ces microdéchets ont la particularité de très bien se conserver dans les sols voire même d'impacter les niveaux sous-jacents par la migration des éléments ferreux en profondeur. La géophysique, par le biais de la susceptibilité magnétique, peut fournir un indicateur de la teneur en oxydes de fer dans le sol. Ainsi la présence de microdéchets de forge aura pour conséquence d'augmenter fortement les valeurs de susceptibilité magnétique. La mesure systématique de ce paramètre après décapage et sa cartographie permet donc, dans un temps court, de rendre compte d'anomalies de susceptibilité potentiellement en lien avec des

concentrations de microdéchets de forge. Cette approche ne se substitue pas à la démarche d'étude paléométallurgique mais vient avantageusement la compléter.

Le site de Sauchy-Lestrée dans le Pas-de-Calais illustre parfaitement cette problématique. Ce site localisé dans l'emprise du projet du canal Seine-Nord-Europe a fait l'objet d'une étude de susceptibilité magnétique avec un susceptibilimètre MS2-D (Bartington Instruments Ltd) (Hulin & Jagou 2014). Alors qu'aucun indice d'un espace de travail du fer n'avait été reconnu lors du décapage, des mesures de susceptibilité magnétique ont été réalisées et ont permis de reconnaître une anomalie bien structurée dans un sol *a priori* stérile (fig. 1).

Cette anomalie présente des limites franches pouvant être interprétées comme des effets de paroi et en adéquation avec certains alignements de trous de poteau reconnus par ailleurs lors de la fouille. Une stratégie de prélèvements basée sur un carroyage fin a été mise en place afin de préciser l'origine de l'anomalie. L'analyse des échantillons a montré la présence d'éléments magnétiques issus du travail de forge (battitures lamellaires et en bille) en proportion faible mais cohérente et en corrélation avec les mesures de susceptibilité magnétique. Ces faibles signaux sont à interpréter par l'absence du sol de forge à proprement parlé dû à un fort taux d'érosion du site. Le signal mesuré est ainsi uniquement lié à une pollution résiduelle des niveaux sous-jacents apportée par les phénomènes de bioturbation.



1. Cartographie de susceptibilité magnétique et proportion de microdéchets de forge sur le secteur 10 du site de Sauchy-Lestrée avec proposition de zonage de la forge (Resp. d'opération : P. Lefèvre ; géophysicien : G. Hulin ; paléométallurgiste : B. Jagou).

Ainsi la géophysique permet ici de reconnaître l'organisation globale de cette aire de travail du fer alors qu'aucun indice n'était visible en fouille. Une analyse comparative entre les résultats de fouille, les mesures géophysiques et l'analyse paléométallurgique permet de mettre en évidence une structure en creux qui aurait pu servir de fosse d'enclume (entourée par des valeurs élevées de susceptibilité magnétique et de plus fortes concentrations en microdéchets magnétiques). L'association des deux approches, géophysique et paléométallurgique, a ainsi permis de révéler une organisation spatiale structurée et d'apporter des éléments sur la chaîne opératoire du travail du fer.

Le recours aux mesures sur surface décapée pour la cartographie des activités de travail du fer est de plus en plus courant en archéologie préventive. Celui-ci est motivé par la très forte signature magnétique des battitures qui les rendent aisément détectables sur la quasi-totalité des sites, quelle que soit la nature des sols (à l'exception des sols d'origine volcanique et métamorphique) ou de leur état de conservation. L'outil utilisé est également relativement simple (Bartington MS2) et sa mise en œuvre rapide ce qui permet un déploiement aisé et une systématisation de l'approche. Les difficultés régulièrement rencontrées sont majoritairement liées à la profondeur d'investigation limitée de ces appareils de mesure. Seuls les cinq premiers centimètres de sol sont pris en compte, ce qui peut être considéré comme un avantage car la mesure est extrêmement localisée mais peut, dans certains cas, se révéler contraignant car les niveaux d'intérêt peuvent ne pas être atteints. Cela implique un décapage réfléchi et adapté en veillant à ce qu'il soit le plus homogène possible tout en s'assurant de ne pas laisser un niveau de recouvrement trop important.

α MESURE SUR SURFACE DÉCAPÉE ET FANTÔMES MAGNÉTIQUES

La susceptibilité magnétique ne permet pas de reconnaître uniquement des éléments métallurgiques. La grande diversité de facteurs qui rentre en jeu dans l'augmentation de la susceptibilité magnétique en font un paramètre géophysique important pour l'archéologie (Le Borgne 1965). Au-delà des phénomènes de chauffe bien connus pour augmenter la susceptibilité des sols, on pourra également citer les phénomènes d'oxydo-réduction (Tite & Mullins 1977) qui permettent de transformer les oxydes de fer peu magnétiques (goethite, hématite, etc.) en oxydes de fer plus magnétiques (magnétite, maghémite). Ces phénomènes sont également accentués par l'activité bactérienne (notamment la présence de magnéto-bactéries dans les sols). Les travaux de Le Borgne dans les années 50 ont ainsi montré que plus les sols sont développés plus les valeurs de susceptibilité magnétique sont importantes (Le Borgne 1955) au point d'en faire un proxy de paléosol.

Au cours des travaux exploratoires de la mise en œuvre de la géophysique en archéologie préventive menés en parallèle à l'Inrap et au Pôle d'archéologie interdépartemental rhénan, nous avons pu mettre en évidence des variations de susceptibilité magnétique sur surface décapée qui n'étaient pas en lien avec une activité paléométallurgique mais plutôt avec des activités agraires et des bâtiments. Ce constat a pu être dressé sur des habitats légers sur trous

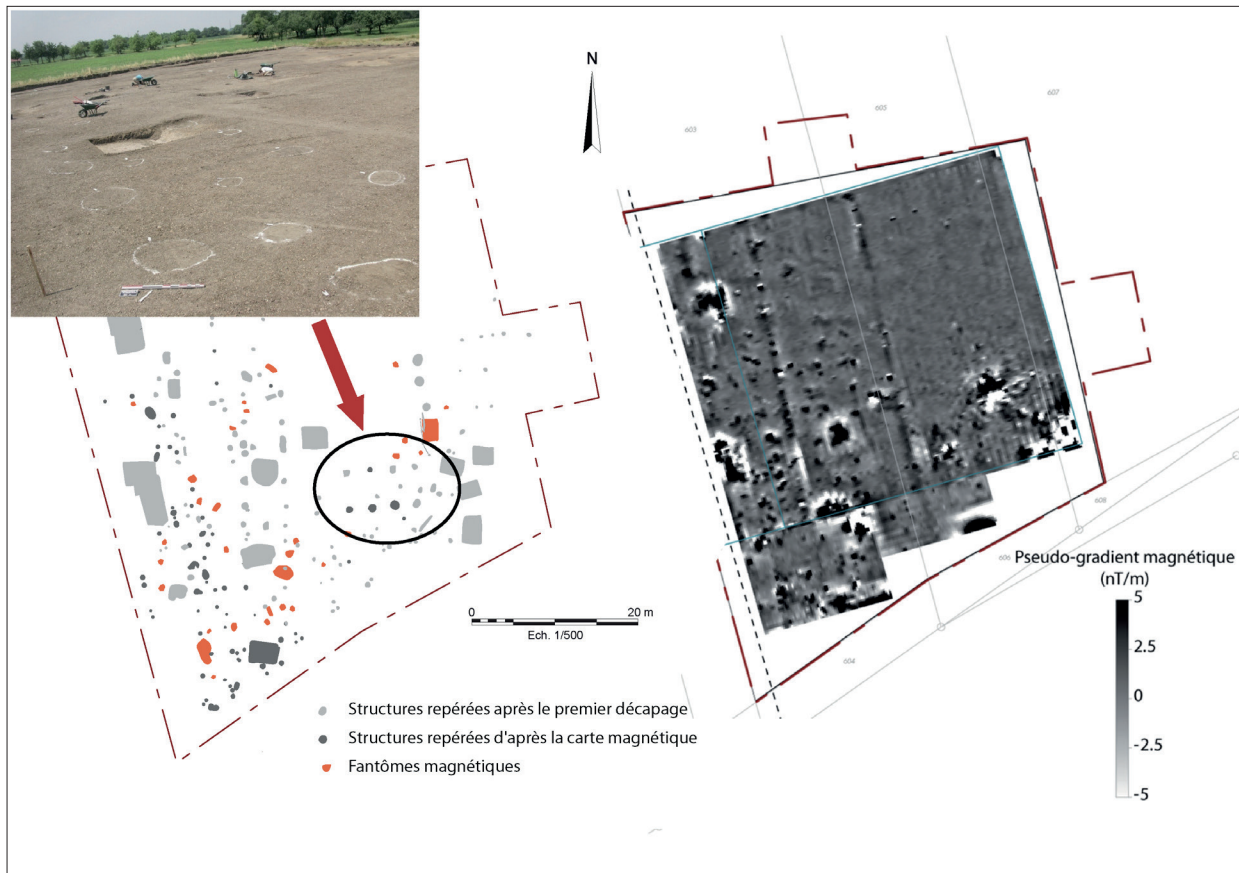
de poteau mais aussi dans des secteurs péri-urbains antiques avec la présence de niveaux de sol altérés ou de démolition (Hulin *et al.* 2012 ; Simon *et al.* 2012). Ces variations ont permis de mettre en évidence des zones de stabulation, des plans de bâtiment voire des systèmes de clôture au sein même de l'habitat. Dans certains cas, ces structures sont invisibles sur la fouille et n'existent qu'au travers de leur signal magnétique. On parle alors de fantômes magnétiques (Linford 2004 ; Fröhlich *et al.* 2005).

Contrairement à la cartographie des zones de travail du fer, les valeurs de susceptibilité magnétique liées aux processus évoqués ici sont de plus faible amplitude et nettement moins contrastées. Il faut alors être vigilants à d'autres phénomènes, comme les variations naturelles de la susceptibilité magnétique avec la profondeur et les effets de décapage comme ceux évoqués précédemment. Pour ce type d'étude, il faut donc prêter une attention toute particulière à la topographie de la zone décapée.

Pour pallier les faibles amplitudes du signal de susceptibilité magnétique on peut également avoir recours à la prospection géomagnétique qui prend en compte la somme des aimantations magnétiques. Néanmoins, celle-ci est particulièrement sensible aux effets indirects telles que les bermes et limites de fouille, toutes deux pouvant générer des variations du même ordre de grandeur que le signal d'intérêt. Cette méthode reste néanmoins très intéressante dans les cas où la susceptibilité magnétique est relativement faible, que les structures sont plus profondes que le niveau décapé ou lorsque l'aimantation rémanente porte une part importante du signal.

α LE RECOUVREMENT DES STRUCTURES ARCHÉOLOGIQUES

Le cas d'étude de Roeschwoog met en exergue ces difficultés (Simon *et al.* 2012). Le site est localisé dans le nord de l'Alsace dans la plaine rhénane. Ici on observe un substrat composé de gravier rhénan sur lequel repose un limon brun de débordement plus récent. Une nécropole jouxte un habitat mérovingien, tous deux ayant fait l'objet d'une étude géophysique, mais c'est la zone d'habitat constituée de plusieurs fonds de cabane, de fosses et de bâtiments sur poteaux dont nous parlerons ici. Dans ce contexte, la lecture des structures était relativement problématique. Le comblement des structures composé du même limon que dans les niveaux les plus superficiels ne se différenciait que difficilement du substrat graveleux. La prospection magnétique avait donc pour objectif de détecter des structures en creux ou des traces d'activités de métallurgie du fer invisibles sur le terrain malgré un effort soutenu de la part des archéologues. La prospection magnétique a été réalisée avec un magnétomètre G-858 (Geometrics) en mode différentiel (capteurs à vapeur de césium situés à 30 cm et à 1,3 m du sol afin de s'affranchir des variations temporelles du champ magnétique terrestre). Les résultats se sont avérés particulièrement intéressants ([fig. 2](#)). Dans un premier temps, la confrontation des observations de terrain et des résultats de la prospection géophysique a permis de montrer que la quasi-totalité des structures détectées lors de la fouille étaient visibles sur la carte magnétique. Ensuite, des



2. Comparaison entre résultats des prospections magnétiques, des observations de terrain et des incohérences observées entre les deux sur le site de Roeschwoog – Am Wasserturm (Simon 2012). (Resp. d'opération : A. Koziol, géophysicien : F.-X. Simon).

anomalies magnétiques clairement marquées ont pu être observées et repositionnées sur le terrain. *A posteriori*, la plupart de ces anomalies ont pu être interprétées comme des structures archéologiques avec un comblement peu différencié mais une signature magnétique singulière amplifiée par la présence de matériel en terre cuite au fond du comblement. Le plan de plusieurs bâtiments a ainsi pu être complété. Étant donné les résultats tout à fait concluants, il a été décidé de réaliser une prospection en bordure de la fouille afin de mesurer l'étendue potentielle de ce site.

La même technique a été mise en œuvre en dehors et sur l'emprise de fouille ce qui a permis d'avoir un protocole comparable entre les données avec et sans décapage des terres superficielles. Hors emprise les résultats se sont avérés aussi pertinents que sur l'emprise de fouille. Un niveau de bruit plus important en lien avec la présence d'hétérogénéités dans les niveaux superficiels du sol était logiquement attendu. La principale surprise ici a été d'observer que l'amplitude du signal mesuré avant décapage était plus importante que l'amplitude du signal mesuré après décapage. Cette observation va à l'encontre des considérations théoriques. En effet plus on s'éloigne de l'objet qui est à l'origine de la perturbation du champ magnétique terrestre plus l'anomalie devrait perdre en intensité. Le site étant relativement plan, il était difficile d'y voir une quelconque corrélation avec la topographie et des variations d'épaisseurs de recouvrement sédimentaire. Afin de mieux comprendre ce cas, nous avons réalisé, en plus de la prospection magnétique, des mesures électromagnétiques basse fréquence.

L'avantage des appareils de mesures électromagnétiques aussi appelés appareils EMI (pour induction électromagnétique) est que la profondeur d'investigation est mieux contrainte (Tabbagh 1986). Ainsi en fonction de l'outil utilisé on est en mesure de dire si le signal magnétique est situé dans les 10, 20, 50 ou 150 premiers centimètres du sol. La possibilité de contrôler ainsi la profondeur d'investigation était de comprendre ce qui se passait dans les premiers centimètres voire décimètres de sol. Les appareils utilisés étaient le CS60 et le VC100, tous deux prototypes réalisés par l'UMR Sisyphe de l'Université Paris VI, et le troisième un susceptibilitémètre, le Bartington MS2. Les deux premiers permettent de réaliser des mesures de susceptibilité apparente sur des profondeurs d'environ 100 cm pour le CS60 et 80 cm pour le VC100. *A contrario* le MS2 présente une profondeur d'investigation de l'ordre de quelques centimètres. La comparaison entre les résultats magnétiques et électromagnétiques est sujette à de nombreuses précautions (Benech *et al.* 2002 ; De Smedt *et al.* 2013). Il faut garder à l'esprit que bien que les deux méthodes soient sensibles aux variations de susceptibilité magnétique, seule la méthode magnétique est capable de détecter les aimantations rémanentes ce qui peut expliquer une partie des différences observées entre les deux types d'acquisition. Les résultats sur le site de Roeschwoog ont ainsi démontré que les structures archéologiques étaient déjà en place dans les horizons de sol les plus superficiels. Cet exemple montre qu'une partie substantielle de l'information archéologique, parce qu'elle est potentiellement invisible dans les niveaux superficiels, peut en effet être enlevée lors de la phase de décapage.

Ces conclusions illustrent les difficultés rencontrées lors de l'analyse géophysique sur terrain décapé, puisque le niveau de décapage n'est pas forcément identique à celui du niveau d'apparition des contrastes géophysiques dans les sols. Elles montrent aussi que les niveaux de sol superficiels revêtent malgré tout un intérêt archéologique considérable et devraient être considérés avec plus de précautions dans les phases de reconnaissance (décapage, prospection aux détecteurs à métaux, etc.)

⌘ PROBLÈME D'INTERPRÉTATION

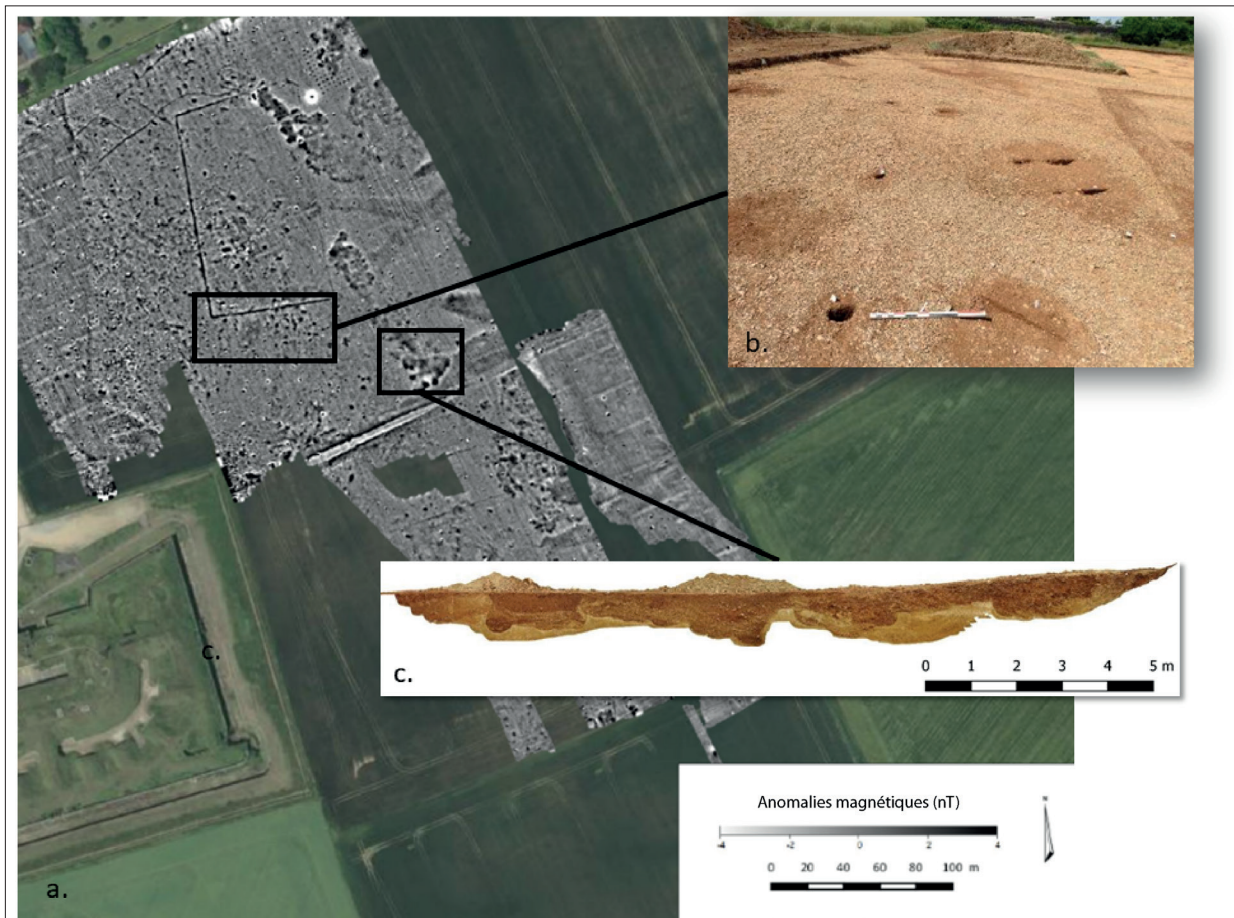
Une autre observation basée sur la comparaison entre résultats de fouille archéologique et cartographie géophysique est la difficulté à interpréter les résultats géophysiques. En effet, si certains plans ou certaines structures, comme les fossés, forment des ensembles assez facilement identifiables, d'autres posent plus de problèmes. En effet, il peut être délicat, dans certains cas, de distinguer une anomalie générée par une fosse naturelle de celle générée par une fosse d'origine anthropique. Si cette observation paraît évidente, elle n'en reste pas moins omniprésente sur les sites étudiés et présentés par ailleurs. Le cas du site de Longvic en Côte-d'Or, illustre bien ce problème et la diversité des interprétations à envisager pour l'étude de ces sites.

Au cours de la fouille d'un enclos du Second âge du Fer dans le cadre d'une opération d'archéologie préventive réalisée en 2018 par G. Videau, une prospection magnétique avec un système de type différentiel (fluxgate Sensys MXPDA) a été réalisée en amont de la fouille. Sur la base des résultats du diagnostic archéologique par tranchées le Service Régional de l'Archéologie a défini des emprises d'ouverture fixes pour la fouille ainsi que des fenêtres d'ouverture modulables en fonction des découvertes réalisées au cours de l'avancement. Afin d'anticiper au mieux les observations de terrain, l'archéologue en charge de l'opération a sollicité la cellule géophysique et télédétection de l'Inrap pour cartographier l'ensemble de la zone d'étude concernée, principalement dans le but d'identifier des concentrations de structures qui auraient pu échapper au diagnostic en tranchées. La prospection magnétique a permis de couvrir une surface totale de 7 ha. Si le signal était relativement faible, le bon état de surface de la parcelle a néanmoins permis la détection de nombreuses anomalies (fig. 3). L'enclos observé par tronçon au cours du diagnostic a ainsi été repéré en totalité sur les données magnétiques. Autour de celui-ci, de multiples anomalies de faible amplitude mais présentant des contours nets ont également été observées. Ces dernières semblent coïncider partiellement avec des structures détectées au cours du diagnostic. À proximité de ce même enclos, sur le flanc est, de grandes anomalies ont également été localisées. Ces dernières, de par leur forme oblongue et sans délimitation nette, avec de nombreuses circonvolutions, semblaient correspondre à des structures naturelles, comme des fosses de colluvionnement ou des dépôts fluviaux anciens.

La fouille, qui s'intéressait prioritairement à l'enclos et aux structures adjacentes, a montré, d'une part, que les petites anomalies à proximité immédiate de l'enclos ne comportaient pas de matériel archéologique et présentaient un comblement assez homogène. Leur attribution archéologique n'a ainsi pu être certifiée ni sur la base des données géophysiques ni sur celle des observations de terrain. L'absence de matériel archéologique laisse à penser qu'elles sont d'origine naturelle et qu'il pourrait s'agir de structures de type fosse de chablis.

À l'inverse les grandes anomalies oblongues, bien qu'évoquant une origine naturelle ont montré, à la fouille, la présence d'une zone à silos. Ces larges dépressions ont été mises à profit pour y installer des structures de stockage. Cette observation *a posteriori* est assez concordante avec les données géophysiques. Au-delà du contour diffus de la structure principale on observe également, en leur sein, des anomalies de plus petites dimensions et de plus forte intensité. Interprétées initialement comme l'effet d'un comblement hétérogène, ces dernières correspondent donc en réalité à la signature des silos retrouvés lors de la fouille.

Cette étude illustre un deuxième phénomène assez récurrent lors de la mise en œuvre de la géophysique en archéologie préventive : la difficulté d'interprétation des structures détectées. Elle montre que, sur un site qui présente *a priori* toutes les caractéristiques géologiques, pédologiques et contextuelles requises pour une analyse géophysique pertinente, on peut observer malgré tout une forte variabilité de détectabilité et de nombreux pièges d'interprétation. Ainsi, si l'ensemble des structures archéologiques a pu être détecté seul le retour entre la fouille et la cartographie géophysique a permis de préciser le plan de ce secteur. Par extrapolation, on peut alors se questionner sur la pertinence des prospections menées sur de très grandes surfaces sans observation archéologique permettant de contraindre l'interprétation.

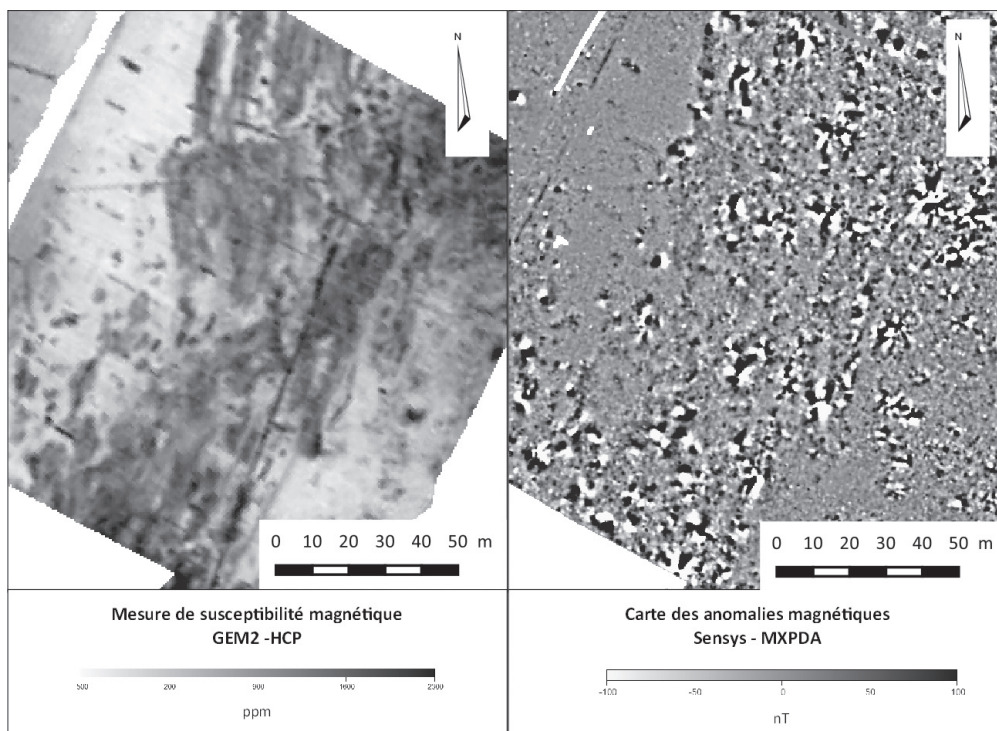


3. Carte des anomalies magnétiques sur le site de Longvic et prises de vue des structures fouillées sur le site : a. Vue générale de la carte des anomalies magnétiques, b. Cuvettes naturelles, c. Vue en coupe des silos (Géophysicien : F.-X. Simon, photos : G. Videau).

α LA MISE EN ŒUVRE DE DIFFÉRENTES MÉTHODES

Ces problèmes de détectabilité et d'interprétation peuvent être partiellement levés par des approches multi-paramètres et multi-méthodes (Simon *et al.* 2015). Ce type de démarche nécessite un investissement plus conséquent mais permet d'augmenter la probabilité de découvertes des structures recherchées.

Les prospections réalisées sur le site de la bataille de Gergovie illustrent cette approche. Dans le cadre de l'étude et de la valorisation de l'oppidum de Gergovie, plusieurs prospections géophysiques ont été réalisées, sur le plateau d'une part mais également sur le Petit Camp et le Grand Camp de César ainsi que sur les fossés de liaison reliant ces deux camps. L'ensemble des sites intéressant ce projet se situe en plein cœur du bassin Clermontois où l'on retrouve une géologie assez complexe rendant elle-même les signaux géophysiques complexes. Dans ce secteur on peut trouver des sols plus ou moins argileux associés à des roches potentiellement très magnétiques de par leur origine volcanique. Le choix des méthodes géophysiques pouvant être utilisées pour la cartographie de ces sites s'avère donc primordial.



4. Carte des anomalies magnétiques (a) et de la susceptibilité magnétique apparente à 5 kHz (b) sur le site du Grand Camp de César à Orcet (Resp. d'opération : Y. Deberge, géophysicien : F.X. Simon).

Pour étudier le Grand Camp, une première prospection magnétique a été réalisée dans son quart nord-est afin d'identifier son fossé d'enceinte d'ores et déjà reconnu ponctuellement lors de sondages anciens. Cette méthode a été retenue car elle permet une acquisition rapide sur de grandes surfaces et est particulièrement sensible aux structures en creux. L'acquisition a été réalisée à l'aide d'un système MXPDA de Sensys. Les résultats n'ont cependant pas permis d'identifier de structure en place (fig. 4). La forte aimantation de la terrasse en gravier basaltique a complètement perturbé le signal magnétique dans ce secteur. Sur la seule base des données géomagnétiques, aucun élément du camp n'aurait donc pu être reconnu ici. La méthode radar et la méthode électrique ont également été ponctuellement testées mais sans résultat probant du fait de la nature du sol. Afin de pallier ces effets, une prospection électromagnétique (EMI) a également été réalisée sur plusieurs hectares à l'aide d'un système tracté associée à un système EM basse fréquence multi-fréquences (GEM2 de Geophex). Rappelons que la méthode EM permet de cartographier simultanément la conductivité électrique apparente et la susceptibilité magnétique apparente. Les difficultés d'étalonnage de ces appareils ne permettent cependant pas d'exprimer systématiquement le signal mesuré en propriétés géophysiques, c'est pourquoi on préférera représenter les valeurs en ppm (autrement dit en signal électromagnétique comme dans la figure 4) représentative ici des contrastes de susceptibilité magnétique. Cette méthode est moins perturbée par les propriétés thermorémanentes du basalte et tire profit des fortes valeurs de susceptibilité magnétique (Guillemoteau *et al.* 2019). Bien que moins adaptée que la méthode magnétique pour la détection de structures en creux dans des milieux peu magnétiques ou moins pollués, la méthode EM basse fréquence a montré ici tout son intérêt. Elle a en effet permis de révéler une partie du fossé malgré une susceptibilité magnétique élevée des blocs

de basaltes environnants. C'est donc ici le recours à différentes méthodes mises en œuvre qui a finalement permis de révéler l'existence du fossé et de valider le tracé proposé au XIX^e siècle lors de la mission archéologique de Stoeffel (Deberge & Dacko 2021).

▣ CONCLUSION

Ces différents exemples et considérations ne vont pas à l'encontre d'une évidence. La géophysique est un outil à même de fournir des informations sur les occupations anciennes. Ces différentes méthodes sont bien adaptées aux sites de l'âge du Fer à condition de prendre en compte leurs limites et contraintes de mise en œuvre. Lorsque l'on s'intéresse aux schémas d'occupation de cette période, la géophysique doit donc être utilisée autant que possible. Sa mise en œuvre récente en archéologie préventive et le retour constant des archéologues permet aujourd'hui d'en tirer quelques enseignements.

Plus qu'un simple outil de cartographie à l'échelle du site et de son environnement, les mesures de la susceptibilité magnétique sur surface décapée sont particulièrement intéressantes. Elles permettent de reconnaître des zones de pollution magnétique et, dans certains cas, des structures et des niveaux de sol totalement invisibles au cours de la fouille. Le seul fait de tester cette technique de manière systématique sur l'emprise du décapage, aussi bien dans le cadre préventif que programmé, permettrait très certainement de réviser en profondeur nos connaissances sur la métallurgie du fer à l'âge du Fer. La mise en évidence de signaux géophysiques dans les horizons superficiels pose aussi la question de la préservation des vestiges dans des niveaux peu lisibles. Cela est d'autant plus compliqué que ce phénomène n'est pas systématique et que sa récurrence reste à évaluer.

On a également pu voir que toutes les anomalies géophysiques ne correspondent pas à des structures archéologiques mais peuvent également être induites par des phénomènes naturels tels que des fosses de chablis, des cuvettes naturelles, etc. Lorsque ces phénomènes sont isolés, il est facile de les distinguer mais lorsque ces derniers sont présents au sein d'ensembles de structures archéologiques, l'interprétation devient alors plus délicate. Là encore les présentations basées sur des concentrations d'anomalies doivent peut-être être revisitées ou, *a minima*, pondérées par un niveau d'incertitude.

Certaines de ces difficultés pourront sans doute être levées par le recours accru à des approches multi-méthodes encore trop peu souvent mises en œuvre. Cela permettrait à la fois de réduire ces effets d'incertitude tout en augmentant le taux de détectabilité.

Ces multiples observations nous permettent d'affiner nos connaissances sur ce qui peut être perçus ou non par la géophysique, de tendre vers une utilisation la plus fiable possible de cet outil tout en ayant conscience de ses limites et de proposer ainsi des interprétations aussi réalistes que possible à l'archéologue tout en minimisant les biais interprétatifs.

BIBLIOGRAPHIE

- Benech, C., Tabbagh, A. et Desvignes, G. (2002) : “Joint inversion of EM and magnetic data for near-surface studies”, *Geophysics*, 67(6), 1729-1739.
- Dabas, M., Décriaud, J.-P., Ducomet, G., Hesse, A., Mounir, A. et Tabbagh, A. (1994) : “Continuous recording of resistivity with towed arrays for systematic mapping of buried structures at shallow depths”, *Revue d’Archéométrie*, 8, 13-17.
- Dabas, M. (1999) : “Contribution de la prospection géophysique à large maille et de la géostatistique à l’étude des tracés autoroutiers – Application aux ferriers de la Buissière sur l’A77”, *Revue d’archéométrie*, 23, 17-32.
- Dabas, M. (2008) : “Theory and practice of the new fast electrical imaging system ARP©”, in *Seeing the Unseen Geophysics and Landscape Archaeology*, 104-128.
- Deberge Y. et Dacko M. (2021) : *La Roche-Blanche (Puy-de-Dôme), Les camps de César au pied de Gergovie, Recherches archéologiques sur les fortifications césariennes de la guerre des Gaules : rapport de prospection thématique*, RFO, Inrap Rhône-Alpes-Auvergne.
- De Smedt, P., Saey, T., Meerschman, E., de Reu, J., de Clercq, W. et van Meirvenne, M. (2013) : “Comparing apparent magnetic susceptibility measurements of a multi-receiver EMI sensor with topsoil and profile magnetic susceptibility data over weak magnetic anomalies”, *Archaeological Prospection*, 21(2), 103-112.
- Ducomet, G. et Druelle, P. (1999) : “Géophysique et archéologie préventive : L’expérience du TGV sud-est”, *AFAN Infos*, 4-9.
- Fichet de Clairfontaine, F. (2014) : “La géophysique appliquée à la recherche archéologique en milieu terrestre, apports et limites”, *Rapport de l’Inspection des Patrimoines*, 2014-31.
- Guillemoteau, J., Simon, F.-X., Hulin, G., Dousteysier, B., Dacko, M. et Tronicke, J. (2019) : “3D imaging of subsurface magnetic permeability/susceptibility with portable frequency domain electromagnetic sensors for near surface exploration”, *Geophysical Journal International*, 219(3), 1773-1785.
- Hulin, G., Broes, F. et Fechner K. (2012) : “Caractérisation de phénomènes anthropiques par la mesure de paramètres magnétiques sur surface décapée. Premiers résultats sur le projet canal Seine-Nord Europe”, *Archéosciences revue d’archéométrie*, 36, 61-70.
- Hulin, G., Jagou, B., De Muylder, M., Henton, A., Lamotte, D., Lefèvre, P. et Rousseau, A. (2014) : “Reconnaître et caractériser les zones de forge sur surface décapée : apport de la géophysique à l’étude paléométallurgique”, *Archéopages*, 39, 90-99, [en ligne] <https://journals.openedition.org/archeopages/560> [consulté le 08/05/2023].
- Hulin, G., Bayard, D., Depaepe, P., Koehler, A., Prilaux, G. et Talon, M. (2018) : “Geophysics and preventive archaeology: comparison with trial trenching on the CSNE project (France)”, *Archaeological Prospection*, 25(2), 1–12, [en ligne] <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/arp.1598> [consulté le 08/05/2023].
- Hulin, G. et Simon, F.-X. (2020) : “Inrap et géophysique : vers une approche raisonnée. Archimède : archéologie et histoire ancienne”, *UMR7044 - Archimède*, 254-259, [en ligne] <https://hal.science/halshs-02893770> [consulté le 08/05/2023].

- Fröhlich, N., Posselt, M. et Schleifer, N. (2005) : “Fouilles à l’aveugle : Les fantômes magnétiques un phénomène nouveau qui témoigne de l’importance des prospections géophysiques en archéologie”, *Les Dossiers d’archéologie*, 308, 44-50.
- Jordan, D. (2009) : “How effective is geophysical survey? A regional review”, *Archaeological Prospection*, 16(2), 77–90.
- Le Borgne, E. (1955) : “Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel”, *Annale de géophysique*, 399-419.
- Le Borgne, E. (1965) : “Les propriétés magnétiques du sol. Application à la prospection des sites archéologiques”, *Archaeo-Physika*, 1, 1-20.
- Linford, N. T. (2004) : “Magnetic ghosts: mineral magnetic measurements on Roman and Anglo-Saxon graves”, *Archaeological Prospection*, 11(3), 167-180.
- Simon, F.-X., (2012) : *L’apport de l’outil géophysique pour la reconnaissance et la caractérisation des sites en archéologie préventive, méthodes et perspectives : exemples en Alsace*, thèse de doctorat, Université Paris VI, Pierre et Marie Curie.
- Simon, F.-X., Koziol, A. et Thiesson, J. (2012) : “Investigating Magnetic Ghosts on an Early Middle Age Settlement: Comparison of Data from Stripped and Non-stripped Areas”, *Archaeological Prospection*, 19(3), 191-200.
- Simon, F.-X., Kalayci, T., Donati, J., Cuenca Garcia, C., Manataki, M. et Sarris, A. (2015) : “How efficient is an integrative approach in archaeological geophysics? Comparative case studies from Neolithic settlements in Thessaly (Central Greece)”, *Near Surface Geophysics*, 13(6), 633-643.
- Tabbagh, A. (1986) : “Applications and advantages of the Slingram electromagnetic method for archaeological prospecting”, *Geophysics*, 51(3), 576-584.
- Tite, M. S. et Mullins, C. (1971) : “Enhancement of the magnetic susceptibility of soils on archaeological sites”, *Archaeometry*, 13(2), 209-219.
- Trinks, I., Hinterleitner, A., Neubauer, W., Nau, E., Löcker, K., Wallner, M., Gabler, M., Filzwieser, R., Wilding, J., Schiel, H., Jansa, V., Schneidhofer, P., Trausmuth, T., Sandici, V., Russ, D., Flöry, S., Kainz, J., Kucera, M., Vonkilch, A., Tencer, T., Gustavsen, L., Kristiansen, M., Bye-Johansen, L.-M., Tønning, C., Zitz, T., Paasche, K., Gansum, T. et Seren, S. (2018) : “Large-area high-resolution ground-penetrating radar measurements for archaeological prospecting”, *Archaeological Prospection*, 25(3), 171-195.



François-Xavier Simon,
Inrap, UMR 6249 Chrono-
Environnement, Besançon,
francois-xavier.simon@inrap.fr

Guillaume Hulin,
Inrap,
UMR 7619 Metis, Paris,
guillaume.hulin@inrap.fr