



HAL
open science

L'archéo-géophysique ou la détection et la cartographie des sites archéologiques

Michel Dabas

► **To cite this version:**

Michel Dabas. L'archéo-géophysique ou la détection et la cartographie des sites archéologiques. Annales des Rencontres archéologiques de Saint-Céré, 2018, 25, pp.117-124. hal-02188753

HAL Id: hal-02188753

<https://hal.science/hal-02188753>

Submitted on 19 Jul 2019

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 4.0 International License

L'Archéo-géophysique ou la détection et cartographie des sites archéologiques.

Michel Dabas, CNRS, Laboratoire AOROC, ENS Paris.

Résumé

Depuis maintenant plus de 60 ans, des géophysiciens essaient d'appliquer les méthodes de la géophysique à la détection et la cartographie des sites archéologiques, donc à des objets très superficiels par rapport à ceux étudiés d'ordinaire : pétrole, charbon, eau, ressources minières. Cette échelle d'investigation – la plupart du temps entre 0 et 2m de profondeur- fait de l'archéo-géophysique un champ spécifique tout comme la géophysique appliquée à la recherche environnementale. Initié en France par Albert Hesse, en Allemagne par Irwin Scollar, en Angleterre par Martin Aitken et en Italie par la Fondation Lerici, ces développements ont permis d'aider les archéologues dans leurs recherches sur le terrain.

Vu souvent comme un outil 'divinatoire' (voir sans sonder), le rôle du géophysicien s'est cantonné dans un premier temps à celui du spécialiste que l'on tolère (archéologie = terrain de jeu pour des expérimentations) et que l'on sollicite sur son terrain d'étude. Fort de l'attribut « non-destructif », la géophysique a commencé à évoluer pour s'adapter aux questionnements archéologiques, très différents des questionnements standards de la géophysique traditionnelle. Car l'objet archéologique est spécifique en plusieurs points : tridimensionnel par essence, il ne se plie guère aux hypothèses simplificatrices utilisées par ailleurs (milieu homogène, objets de dimensions importantes par rapport à leurs profondeurs d'enfouissement). Méthodes et raisonnements doivent s'adapter aux problématiques archéologiques. Nous développerons les deux méthodes reines que sont l'électrique et le magnétique puis la dernière apparue : le radar-sol. D'autres méthodes peuvent être employées comme la sismique réfraction ou réflexion, la gravimétrie ou la prospection thermique mais restent anecdotiques pour le domaine de l'archéo-géophysique et ne seront pas abordées ici.

La donnée géophysique, une fois traitée par le géophysicien doit être appréhendée par l'archéologue généralement sous forme de cartes. Si la phase de définition de la problématique archéologique est importante, celle de l'interprétation l'est encore plus. Déconnecté du raisonnement archéologique, le géophysicien sera cantonné dans son rôle de spécialiste dont le rapport ne constituera qu'une annexe des rapports archéologiques. De même si l'archéologue interprète les données géophysiques sans le contrôle du géophysicien, le risque de mauvaise ou de sur-interprétation est évident. Les récents progrès instrumentaux (motorisation, géolocalisation, multicapteurs) ainsi que ceux des technologies de visualisation (SIG, Réalité virtuelle) permettent de croire que nous sommes arrivés à un stade mature technologiquement. Les avancées futures viendront plus de l'amélioration du dialogue entre géophysiciens et archéologues que de la technologie. De ce travail commun pourra alors émerger un véritable questionnement profitable aux deux parties.

Introduction

L'archéo-géophysique est une branche de la géophysique qui s'est développée depuis maintenant une soixantaine d'années. En France, ce sont les travaux précurseurs d'Albert Hesse au Centre de Recherche Géophysique de Garchy (Nièvre) puis d'Alain Tabbagh qui ont permis dès les années 60 le développement de cette géophysique appliquée aux questionnements archéologiques. Rapidement, on a demandé au géophysicien de détecter les sites archéologiques en amont des fouilles. Il s'agissait donc d'une démarche prédictive de détection : s'il y a un site où se situe-il ? Dans un deuxième temps,

sur des sites connus, on a demandé au géophysicien de cartographier l'extension du site : quelle est la limite de ce site partiellement fouillé ? ou alors si un site est détecté par géophysique, peut-on obtenir le maximum de détails sur sa structuration interne ? On est dans ce cas dans une démarche de cartographie. Très rapidement, on a pu opposer l'approche extensive de la géophysique à l'approche intensive des fouilles. Cette opposition, qui n'est pas une contradiction, n'a fait que s'accroître : le développement instrumental des méthodes géophysiques fait que des surfaces de plus en plus importantes peuvent être prospectées, alors que les fouilles avec une rigueur scientifique de plus en plus exigeante ont vu leur surface diminuer. Cette opposition extensif versus intensif est en fait une question d'échelle spatiale.

La prospection géophysique appliquée à l'archéologie répond donc à la question de détection et de cartographie des structures archéologiques enfouies que l'on peut même étendre à leur environnement (recherche d'anciens chenaux, caractérisation des épaisseurs sédimentaires, etc.). Le but est donc d'inventorier les sites archéologiques – démarche prédictive d'inventaire et de les caractériser aussi précisément que possible. L'archéo-géophysique est donc un des outils au service de l'archéologue afin de mieux planifier ses sondages et ses fouilles. Il ne remplace pas ni ne se substitue à l'archéologue qui reste la seule personne capable de donner les éléments de datation et de conservation des sites. L'archéo-géophysicien dialoguera aussi bien avec les aménageurs qui voient souvent les structures archéologiques enfouies comme un « risque » qu'il faut prendre le plus en amont possible des travaux, qu'avec les archéologues pour qui ces structures sont une potentialité pour mieux connaître notre passé. L'évolution de l'expertise de l'archéo-géophysicien est telle maintenant que sa discipline est devenue autonome par rapport aux archéologues : un colloque bisannuel (*ICAP International Conference of Archaeological Prospection*), une revue internationale (*Archaeological Prospection*), une lettre d'information électronique et une association (*ISAP International Society of Archaeological Prospection*) montrent que l'archéo-géophysique est devenue un objet de recherche en soi.

Place de la géophysique dans les méthodes de détection des sites archéologiques

La prospection géophysique n'est en fait qu'une des méthodes de prospections. Elle est employée souvent en conjonction avec d'autres méthodes qui aident à localiser les sites : étude des plans anciens, témoignages oraux, carottages, prospection mécanique par sondages destructifs, prospection aérienne (photographies aériennes verticales ou obliques dans le domaine visible ou infra-rouge, images satellitaires), prospection pédestre (ramassage de surface sur les champs labourés généralement). Actuellement, du moins en France, la prospection mécanique sous forme de tranchées parallèles à 5 ou 10% (rapport entre la surface ouverte et la surface totale du terrain étudié) est celle qui est devenue de facto la norme en archéologie préventive, celle qui s'intéresse à l'estimation du risque archéologique avant aménagement. Ce n'est le cas ni pour d'autres pays européens, ni en archéologie programmée (celle qui étudie les sites archéologiques en dehors de toute menace d'aménagement et pour répondre à un questionnement scientifique) où la prospection géophysique a acquis une place importante.

Les sondages mécaniques restent indispensables on l'a dit pour les éléments de datation et de conservation, mais ils posent trois problèmes méthodologiques :

- Comment évaluer l'hétérogénéité du sous-sol (autrement dit quelle est la densité de sondages nécessaire et leur profondeur pour bien appréhender la densité des sites archéologiques) ?
- Où placer les sondages = plan de sondages (autrement dit quelle information me permet de placer au mieux les tranchées qui seront ouvertes) ?

- Comment spatialiser le résultat d'un sondage (autrement dit quand une structure est trouvée dans une tranchée, comment se poursuit-elle entre deux tranchées) ?

Les protocoles des tranchées mécaniques sont actuellement figés et très peu d'études statistiques se sont penchées sur la validité statistique d'une telle pratique (en comparant par exemple les indices trouvés dans les tranchées par rapport aux nombres de structures trouvées dans le cadre d'un décapage ultérieur total d'une surface).



Fig. 1 Tranchées mécaniques de diagnostic, plateau de Saclay

La prospection géophysique, tout comme la prospection aérienne permet maintenant de couvrir l'intégralité des surfaces à explorer quelles que soient leur taille (jusqu'à plusieurs centaines d'hectares pour les plus gros projets). Ce sont bien sûr des méthodes non-destructives qui permettent de sauvegarder notre patrimoine enfoui. L'impact environnemental est donc nul. Les structures cartographiées le sont quelle que soit leur âge et leur structure spatiale. De plus, et ceci est spécifique à la géophysique, les cartes produites peuvent être valorisables pour les autres corps de métiers impliqués dans l'aménagement (géotechnique, hydrogéologie, pédologie). L'information apportée par le géophysicien permet donc d'aider les services de l'Etat (SRA Services Régionaux de l'Archéologie) qui seront prescripteurs des éventuelles futures fouilles. Rappelons que la phase fouille reste la plus longue et la plus dispendieuse des phases de l'archéologie préventive. Toute erreur sur la prescription peut entraîner des retards conséquents sur les travaux, et donc des pénalités, dont les montants sont sans aucune mesure avec ceux des prospections. Enfin, signalons que les documents produits maintenant par les géophysiciens, tout comme les prospecteurs aériens, sont compatibles avec un archivage pérenne et standardisé, ce qui permet entre autre chose d'alimenter facilement la carte archéologique nationale.

Si l'on devait faire un bilan des inconvénients et avantages de la prospection géophysique par rapport à la prospection mécanique en archéologie préventive, nous citerions pour les inconvénients (par ordre d'importance) :

- ✓ pas d'éléments de datation, peu d'éléments permettant de donner l'état de conservation ;
- ✓ des limites dans la reconnaissance des structures petites à grande profondeur, ce qui introduit un biais pour certaines périodes chronologiques et/ou certains environnements ;

- ✓ des limites dans les terrains géologiquement complexes ou déjà fortement « déstructurés » (friches industrielles).

Ces inconvénients sont les mêmes par ailleurs pour la prospection aérienne par exemple. Quant aux avantages de l'usage de la géophysique, citons :

- ✓ une grande précision sur la totalité de la surface avec plusieurs profondeurs de détection possibles ;
- ✓ La localisation des zones d'érosion et d'accumulation (pièges) et donc la connaissance très tôt des zones sensibles ;
- ✓ une aide raisonnée à l'implantation de sondages ;
- ✓ une aide à l'estimation des coûts (sondages et fouilles) ;
- ✓ une mobilisation rapide, sans nécessaire maîtrise foncière des terrains.

Dans le cas de l'archéologie programmée, la géophysique est devenue comme l'a souligné un récent rapport une méthode qui est devenue incontournable. Elle permet dans le meilleur des cas, de fournir des plans précis des structures avant fouille, elle oriente les fouilles sur les endroits jugés les plus stratégiques en fonction des questionnements scientifiques de notre époque. Elle permet aussi d'intégrer les résultats de la fouille dans un espace plus important et fournit ainsi souvent un complément du plan des structures fouillées à l'extérieur de l'emprise fouillée.

La prospection aérienne reste la méthode de prédilection pour l'étude de grandes zones (plusieurs milliers d'hectares). Souvent effectuée par des personnes connaissant bien un territoire donné, elle permet en fonction des conditions climatiques de fournir un premier bilan de la densité des occupations sur ce même territoire. Elle reste tributaire néanmoins de la disponibilité des prospecteurs aériens, du type de culture (les résultats sont très faibles sur les paysages non céréaliers par exemple) et surtout de l'historique climatique qui rend possible ou pas l'apparition des anomalies au sol (anomalies de croissance des plantes, verse des céréales, taches d'humidité, etc.).

En dernier lieu, nous citerons la méthode LIDAR aéroportée qui a permis depuis peu de découvrir nombre de sites surtout en milieu forestier là où les autres méthodes de prospection sont très peu efficaces. C'est une méthode permettant de mettre en évidence un site par son relief (un laser balaye la scène sous l'avion et le temps d'aller-retour du laser est enregistré pour tous les points au sol). Nous rappelons ici que le laser, s'il peut pénétrer sous un couvert forestier peu dense, ne peut rentrer dans le sol, au contraire des ondes utilisées en prospection géophysique. Un site ne sera visible en prospection LIDAR que s'il a laissé un micro-relief en surface. Cette nouvelle méthode qui nécessite des moyens importants (mais néanmoins d'un coût faible si on le rapporte à l'hectare) reste sans comparaison pour la détection des sites sous couvert forestier. Dans les plaines agricoles, le nivellement dû à la mécanisation rend la méthode LIDAR peu utile sauf pour la détection des anciens parcellaires.



Fig.2 Mesure géophysique en continu (EM31 Geonics) sur le projet d'aménagement de Vémars (Val d'Oise). En arrière-plan des tranchées mécaniques de diagnostic. Geocarta©

Technologies d'imagerie géophysique

Les méthodes d'imagerie du sous-sol en particulier pour l'archéologie ont beaucoup évolué depuis une vingtaine d'années. Globalement, elles permettent de couvrir les surfaces plus rapidement, avec aussi bien une meilleure résolution spatiale (nombre de mesures par mètre carré) qu'une meilleure résolution de mesure, et ce pour des coûts de plus en plus faibles. Cette évolution est liée bien sûr aux progrès de l'électronique et de l'informatique, mais aussi à de nouvelles mises en œuvre motorisées. Les surfaces qui étaient prospectables à la main il y vingt ans étaient de l'ordre de 0,25 à 0,5 ha par jour. Elles sont actuellement de 3 à 15 ha/jour en fonction des méthodes utilisées et de la configuration des parcelles. Il faut souligner ici le rôle capital des méthodes de positionnement dans cette évolution. En effet, une carte géophysique nécessite que chaque mesure soit positionnée avec une précision planimétrique au minimum égale à la taille de la plus petite anomalie que l'on cherche à détecter. Auparavant, l'utilisation des moyens traditionnels comme le décamètre, la boussole ou la station totale était la règle. Chaque mesure était donc positionnée manuellement généralement le long de profils pré-implantés. L'apparition des GPS ainsi que les variantes plus précises (dGPS de classe décimétrique ou RTK de classe centimétrique) ont permis d'associer automatiquement chaque mesure à une position, rendant toute topographie préalable superflue. Il en a résulté un gain de temps très important et même pour les meilleures technologies GPS, un gain de précision planimétrique, et donc de la carte produite, important. Cette évolution a bénéficié aussi à d'autres méthodes de prospection comme la prospection aérienne par exemple ou la prospection pédestre. On remarquera néanmoins que ce gain de productivité n'existe que pour les endroits où la réception GPS est satisfaisante, les sous-bois ainsi que les villes restant encore des zones difficiles. Pour ces mêmes zones, les moyens

motorisés sont aussi difficiles de mise en œuvre. On peut donc dire qu'à l'heure actuelle, l'impact de l'évolution des moyens d'investigation en géophysique a été le plus important pour tous les sites en environnement ouvert (*open-field*) qui sont par ailleurs ceux que l'on retrouve majoritairement dans les chantiers d'aménagement du territoire. Ces zones sont aussi celles où la prospection aérienne donne les meilleurs résultats. Dans ce tableau, le LIDAR reste une des seules méthodes applicables pour les zones boisées. Enfin, les chantiers en urbain restent le cas le plus complexe à aborder : très peu de méthodes géophysiques y sont utilisables, les surfaces sont très petites et la complexité du sous-sol extrême. Les cas d'application de la géophysique pour l'archéologie y sont très rares même si des recherches existent en particulier sur les sous-sols des édifices religieux par exemple.

Nous aborderons maintenant les trois classes de méthode les plus utilisées en détection et cartographie archéologique en commençant par la plus ancienne, qui est aussi la plus universelle : la prospection électrique.

1-Méthodes électriques

L'archéo-géophysicien dans cette méthode va mesurer la résistivité électrique apparente du sol. Ce paramètre traduit la difficulté avec laquelle un courant électrique peut traverser un volume de sol donné. L'inverse de la résistivité s'appelle la conductivité électrique et traduit donc la facilité avec laquelle un courant traverse ce même volume de sol. Si un sol est très sec ou très pierreux, sa résistivité sera haute. Inversement, s'il est humide, salé ou argileux, sa résistivité sera basse. Les deux extrêmes sont le vide (résistivité infinie) et un métal (résistivité proche de zéro). La résistivité d'un sol va donc varier pendant une année. Classiquement, la résistivité électrique d'un sol sera fonction d'un ensemble de paramètres tels que sa teneur en eau, sa porosité (rapport du volume de vide sur le volume total), la conductivité ionique des liquides présents, etc. L'archéo-géophysicien ne sera donc pas intéressé par la valeur absolue de la résistivité mais par ses variations : pour la détection archéologique, nous étudierons les variations de résistivité électrique entre le sol et les différentes structures archéologiques enfouies. Il faut que de telles variations existent, et soient mesurables, pour que l'objet soit détectable, comme d'ailleurs pour toutes les autres méthodes de prospection. Notre expérience nous a montré que la grande majorité des structures archéologiques possèdent toujours un contraste électrique, ce qui n'est pas forcément le cas pour la méthode magnétique par exemple. Les murs seront en particulier le type de structure le plus facilement détectable par cette méthode : leur résistivité électrique sera plus importante que celui du sol environnant. Les structures en creux comme des anciens fossés seront aussi détectables : ils pourront être aussi bien résistants électriquement s'ils ont été comblés avec des pierres, que conducteurs (cas le plus fréquent) si de l'humidité y est présent.

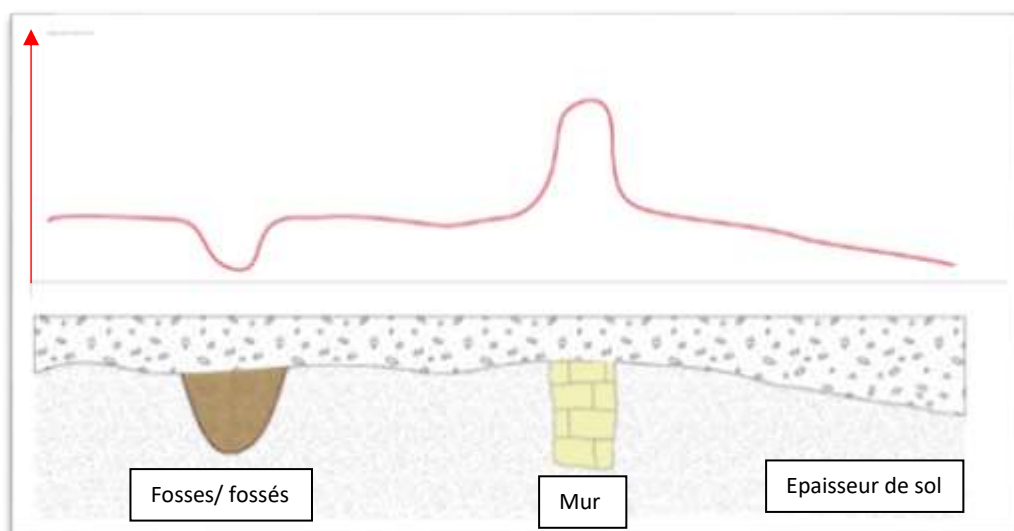


Fig.3 Variations de la résistivité électrique au-dessus de structures archéologiques enfouies

Sur la figure 3, on peut aussi remarquer qu'il sera possible de détecter les variations d'épaisseur du sol puisque celui-ci a généralement une résistivité plus élevée que celle du sol.

Cette méthode est aisée à mettre en œuvre, nécessite des appareils relativement peu complexes (résistivimètres), et la forme des anomalies mesurées est simple. Le courant injecté dans le sol par des électrodes est faible, de quelques millampères. Ce courant crée dans le sol un potentiel électrique que l'on mesure avec d'autres électrodes. Le rapport d'une différence de potentiel à l'intensité donne par définition une résistance électrique (loi d'Ohm). La mesure se fait en un point donné. L'opérateur sur le terrain enchaîne les mesures dans les deux directions pour couvrir l'ensemble de la zone à investiguer. Pratiquement les électrodes sont solidaires et l'opérateur ne déplace qu'un porte-électrode couplé au résistivimètre. Fait intéressant, la distance entre les électrodes contrôle la profondeur d'investigation (la profondeur maximale pour laquelle une structure est détectable). Il est donc possible, contrairement aux autres méthodes géophysiques, radar excepté, de contrôler la profondeur d'investigation. L'utilisation d'une géométrie d'électrode permet d'obtenir une cartographie horizontale du sol (soit une image de toutes les structures présentes dans le sol jusqu'à la profondeur d'investigation). Le passage à plusieurs profondeurs d'investigation nécessite par contre beaucoup plus de temps.

La méthode était essentiellement manuelle avec déplacement et plantage des électrodes selon un pas régulier (généralement 0,5m). Les surfaces prospectées à la main ne pouvaient dépasser 0,5 ha/jour. En 2001, nous avons développé un système capable de prendre des mesures en continu : les électrodes sont remplacées par des roues à pointe sur un essieu isolé (système ARP®), lui-même tiré par un quad ou un engin tout terrain. Chaque roue est en fait une électrode. L'électronique permet de prendre des mesures rapidement avec un pas fixe (tous les 10cm en archéologie par exemple) et de positionner les mesures en temps réel avec un GPS. Avec un quad, il est ainsi possible de prospecter plusieurs hectares par jour en fonction des conditions de terrain (en archéologie les mesures sont généralement effectuées le long de profils parallèles espacés de 1m, soit 10km d'acquisition par hectare). La définition des cartes acquises en continu a même augmenté par rapport à la méthode manuelle puisqu'on dispose d'une mesure tous les 10cm en mode tracté versus tous les 50cm en mode manuel.

Certaines situations empêchent la méthode de fonctionner correctement: un sol trop sec en été ne laissera que difficilement passer le courant, un sol gelé est aussi trop résistant électriquement. Mis à part ces deux extrêmes, c'est une méthode très robuste et adaptée à la détection et la cartographie des structures archéologiques. Comme d'ailleurs d'autres méthodes géophysiques, signalons qu'il est difficile de détecter une structure de petit volume si sa profondeur d'enfouissement est importante par rapport à sa taille (exemple d'un trou de poteau par exemple à plusieurs mètres de profondeur). Plusieurs variantes de la méthode existent qui diffèrent essentiellement en fonction de l'emplacement des électrodes plantées au sol. Sans rentrer dans le détail, ces variantes permettent de calculer précisément les profondeurs du sol par exemple ou même d'obtenir une carte représentant la structure verticale du sol et des structures présentes.

La carte suivante présente deux prospections électriques effectuées pour le compte du Conseil Général de l'Eure sur le site gallo-romain du Vieil-Evreux. Elles sont représentées en densité de gris, le blanc représentant des structures résistantes, le noir des structures conductrices. Ces deux prospections sont incrustées sur une photographie aérienne verticale de l'IGN montrant la zone des thermes fouillées ainsi que les aménagements autour sous forme d'un jardin paysager. La prospection au Nord montre un édifice de plan rectangulaire (les zones blanches résistantes sont assimilées à des murs enfouis) avec une pièce carrée centrale. Ce type d'édifice bien connu en gaule et aussi ailleurs sur ce même site grâce à la prospection aérienne correspond à un temple (*fanum*). Il n'a pas encore été

fouillé. Pour la prospection sud-est, on note une série de taches blanches résistantes équidistantes interprétées comme les piles d'un aqueduc qui à cet endroit était aérien (on se situe dans une petite vallée et les aqueducs ont pu aussi être détectés sur de grandes distances par les photographies aériennes. L'eau avait un rôle capital pour alimenter les édifices publics dont les thermes juste à côté). Au Nord une structure en hémicycle avait été d'abord interprétée comme un temple de l'eau (nymphee) mais, après fouille, elle a été interprétée comme un marché (*macellum*).



Fig. 4 Cartographies électriques (zones en noir et blanc) pour une profondeur moyenne de 1m incrustées sur une photographie aérienne de part et d'autre des thermes gallo-romains du site du Vieil-Evreux (Eure) : mise en évidence au Nord des murs d'un temple celtique et au Sud-Est des piliers d'un aqueduc relié à une structure hémisphérique interprétée comme un macellum (demande Laurent Guyard, CG Eure, prospection manuelle Terra Nova et ARP® Géocarta).

2-Méthodes magnétiques

L'archéo-géophysicien dans cette méthode va mesurer les variations du champ magnétique terrestre qui sont liées pour partie à un paramètre: la susceptibilité magnétique. Elle traduit simplement la capacité d'un corps à s'aimanter. C'est un paramètre extrêmement important dans la prospection archéologique, car il peut être modifié par une action humaine passée. Les porteurs de la susceptibilité sont des particules d'oxydes de fer présents dans tous les sols (oxydes, hydroxydes et sulfures de fer). Ils proviennent de l'altération de la roche-mère pour partie - et sont donc à ce titre un indicateur de l'évolution du sol, mais aussi de l'action humaine, qui peut favoriser ou non la création de ces oxydes. Le mécanisme le plus connu est l'action du feu, qui favorise la transformation de certains oxydes de fer en des formes plus magnétiques, que l'on peut détecter. On peut ainsi localiser facilement un sol chauffé, des argiles cuites, et évidemment des objets métalliques comme des scories. On a remarqué aussi que les structures fossoyées (fosses, fossés, trous de poteaux) possèdent très souvent un magnétisme faible qui les rend néanmoins détectables. La méthode magnétique est d'ailleurs recommandée pour la détection des structures fossoyées tout comme l'électrique est recommandée pour les structures en dur (murs, empièvements, etc.).

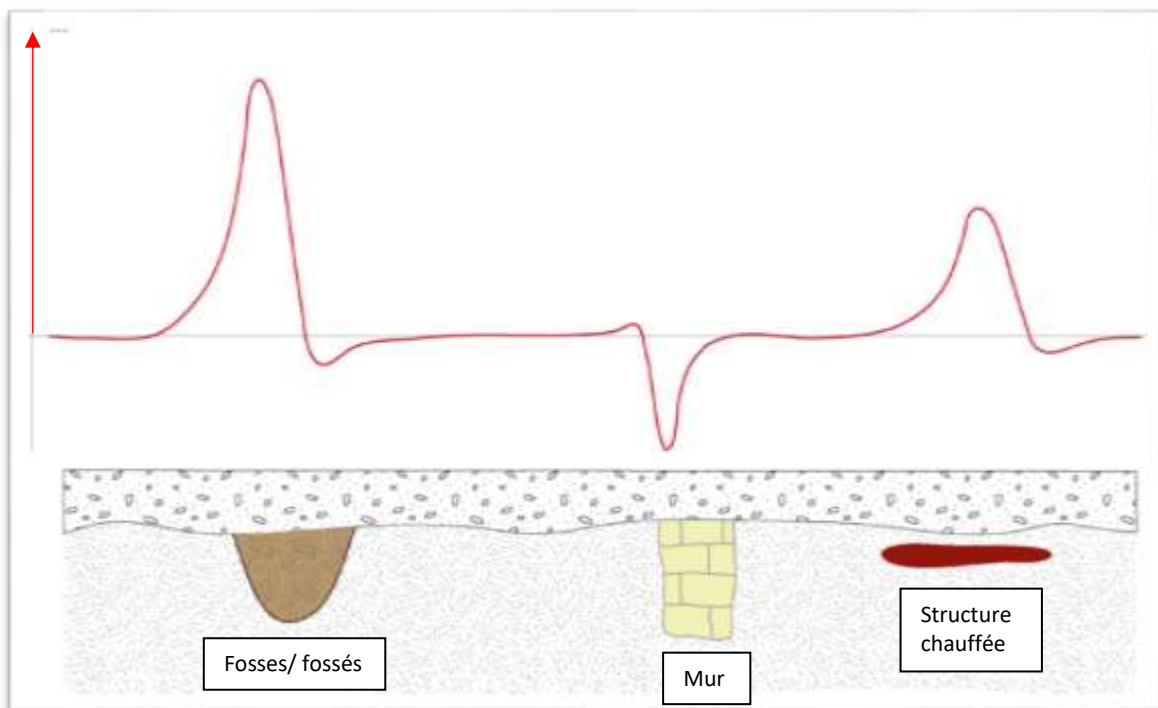


Fig. 5 Variations du champ magnétique terrestre au-dessus de structures archéologiques enfouies

Cette méthode est aisée à mettre en œuvre et est employée en particulier pour la détection des bombes non explosées. De nombreux appareils (capteurs) existent suite aux développements des applications militaires. Contrairement à la méthode électrique, on peut donc disposer de nombreux types de capteur et ceux-ci sont portés par l'opérateur permettant une mesure en continu. Elle est donc plus rapide que la méthode électrique. Un opérateur à pied peut prospecter une surface de plus d'un hectare par jour (avec toujours un espacement entre profils de 50cm soit 20km par hectare). Contrairement à la méthode électrique, il est possible d'utiliser plusieurs capteurs à la fois, réduisant ainsi la distance à parcourir par hectare. A partir de 2006 dans le cadre d'un programme de recherche avec l'ENS de Paris, nous avons développé un système utilisant 5 capteurs simultanément et tiré par

un engin tout terrain : l'AMP. Tout comme l'ARP®, le système couple une mesure très précise du champ magnétique et un positionnement en temps réel. La surface prospectable est passée ainsi à plus de 10ha/jour en fonction de la praticabilité du terrain.

La principale contre-indication de l'emploi de la méthode magnétique est la pollution magnétique : les terrains proches des villes, la présence de pylônes et lignes électriques, les canalisations enterrées, les véhicules qui passent sur les routes à côté du terrain de prospection créent des signaux très forts qui vont interférer avec les signaux plus faibles issus des structures archéologiques enfouies. Contrairement à la méthode électrique, les conditions météorologiques seront sans conséquences. Par contre, l'existence d'un signal magnétique des structures archéologiques n'est pas systématique : certaines structures ne sont pas magnétiques ou ont perdu leur magnétisme. Cette méthode est donc un peu moins universelle que la méthode électrique, mais reste très utilisée dans le monde entier suite à sa facilité de mise en œuvre.

Il faut signaler aussi que la notion de profondeur d'investigation est moins bien définie pour cette méthode que pour les autres méthodes : il est difficile de préciser la profondeur d'une structure détectée et la mise en œuvre la plus classique de la méthode (pseudo-gradient vertical de la composante verticale du champ magnétique terrestre) a tendance à favoriser les anomalies les plus superficielles.

La carte suivante présente une prospection magnétique tractée AMP effectuée dans le cadre d'un programme de recherche sur l'économie celtique. Elles sont représentées en densité de noir sur fond marron, le noir représentant les structures les plus magnétiques. Cette prospection est incrustée sur une photographie aérienne verticale de l'IGN montrant les champs labourés tout autour. La prospection montre deux structures incurvées interprétées comme des fossés entourant le site interprété tout d'abord comme un petit oppidum de plaine. Le fossé interne est interrompu par une ouverture (porte). A l'intérieur des fossés, des anomalies beaucoup plus fortes mais ponctuelles montrent l'existence d'éléments métalliques et de métallurgie du fer caractérisés par la fouille. Le site a été interprété comme une ferme fortifiée de l'Age du Fer (*demande K. Gruel et O. Buchenschutz, ENS Paris, prospection automatisée Géocarta AMP*).



Fig. 6 Cartographie magnétique (zones en marron) incrustée sur une photographie aérienne sur le site de Meunet-Planches (Indre) : mise en évidence de deux fossés et d'une porte sur un site interprété comme une ferme fortifiée de l'âge du fer (demande K. Gruel et O. Buchenschutz, ENS Paris, Programme Celsectophys, prospection Geocarta avec l'AMP).

3-Méthodes radar

Dernière en date, la prospection radar tient une place particulière par rapport aux autres méthodes géophysiques. Le paramètre physique dont dépend cette méthode est principalement la constante diélectrique. Celle-ci représente la capacité d'un matériau à se polariser sous l'effet d'un champ électrique. Retenons que la constante diélectrique est très liée à la présence de l'eau dans le sol, tout comme la méthode électrique. Des trois méthodes décrites ici, c'est la seule qui permette de bien estimer les profondeurs des structures.

Même si le principe de la méthode radar (*Radio Detection And Ranging*) est ancien (1930), son application systématique à l'archéologie est plus récente (années 2000). Le principe du radar, identique au principe de ceux utilisés pour le contrôle de la circulation routière ou aérienne, consiste à émettre à l'aide d'une antenne une onde électromagnétique haute fréquence (généralement entre 25 et 1000 MHz, c'est-à-dire les fréquences radio aussi utilisées par les téléphones cellulaires) et à recevoir sur une antenne réceptrice les échos qui se produisent

sur les différents matériaux rencontrés. Pour qu'il y ait une réponse (un écho), il faut qu'il y ait notamment une variation de la constante diélectrique. Connaissant la vitesse de propagation dans le milieu, on en déduit la distance ou la profondeur de la cible. La complexité de l'application du radar en archéologie tient au fait que l'onde se propage dans le sol et non dans l'air. Dans un sol, l'énergie de l'onde radar peut être absorbée très rapidement (moins d'un mètre, voire quelques centimètres dans l'argile) et l'onde est « dispersée » par la présence des nombreuses hétérogénéités dans le sol. Pour le différencier des autres radars, celui utilisé en archéologie est appelé radar-sol (GPR en anglais).

Bien que l'utilisation devienne de plus en plus systématique pour rechercher toutes les servitudes souterraines dans les villes (lignes électriques, tuyaux de gaz, d'eau), il demeure un matériel très onéreux. L'emploi de ce matériel en archéologie doit être parfaitement justifié par rapport aux autres méthodes moins onéreuses et plus robustes. De plus le radar reste à l'heure actuelle une affaire de spécialiste : son domaine d'application est essentiellement le génie civil (détection des ferrillages dans le béton, auscultation de route pour un contrôle de qualité ou détection de fracturation dans des ouvrages), et peu de personnes ont une expérience dans sa mise en œuvre et son traitement relativement complexe en archéologie. Dans les cas où son application est conseillée, il peut néanmoins donner des résultats d'une meilleure définition spatiale que les autres méthodes. Son principal avantage est de pouvoir estimer finement la profondeur des structures. Au vu de son prix, une prospection radar ne doit être déclenchée sur un terrain qu'à des fins de cartographie d'une ou de plusieurs structures archéologiques connues, et ne peut donc être considérée comme une méthode de détection préalable en archéologie.

La présence de terrains argileux ou conducteurs électriquement (salés) sont des contre-indications fortes. La présence d'hétérogénéités nombreuses (milieu diffractant comme des couches de gravier) peut être une contre-indication en fonction de la fréquence utilisée dans la prospection radar. Enfin, les technologies d'antenne utilisées actuellement font que celles-ci doivent être en contact avec le sol ; un sol labouré, une friche, des cailloux en surface en surface empêchent un bon couplage de l'antenne et donc de bonnes mesures. Par rapport aux autres méthodes, le radar-sol reste donc très sensible aux conditions du terrain. Son application par contre sur le bitume et les surfaces pavées en ville est indiquée.

Comme pour les autres méthodes décrites, l'opérateur va parcourir le terrain à cartographier selon des profils parallèles dans un mode d'acquisition en continu (espacement entre mesures voisin de quelques centimètres). Pour chaque mesure, le système va enregistrer tous les échos dans le sol jusqu'à une certaine profondeur fonction du matériel utilisé, du terrain et de la fréquence utilisée. L'espacement entre les profils est fonction de plusieurs paramètres, mais voisin de 10cm en archéologie (1ha correspond donc à 100km de profils, le gain de définition spatiale précédemment mentionné a donc un coût important.). Au lieu d'obtenir des résultats sous forme d'une seule carte comme en électrique ou en magnétique, l'archéo-géophysicien peut traiter les données pour créer des sections verticales ou horizontales du terrain (dans la pratique, on définit une vingtaine de tranches de profondeur ou bien on essaye de visualiser en 3 dimensions les données).

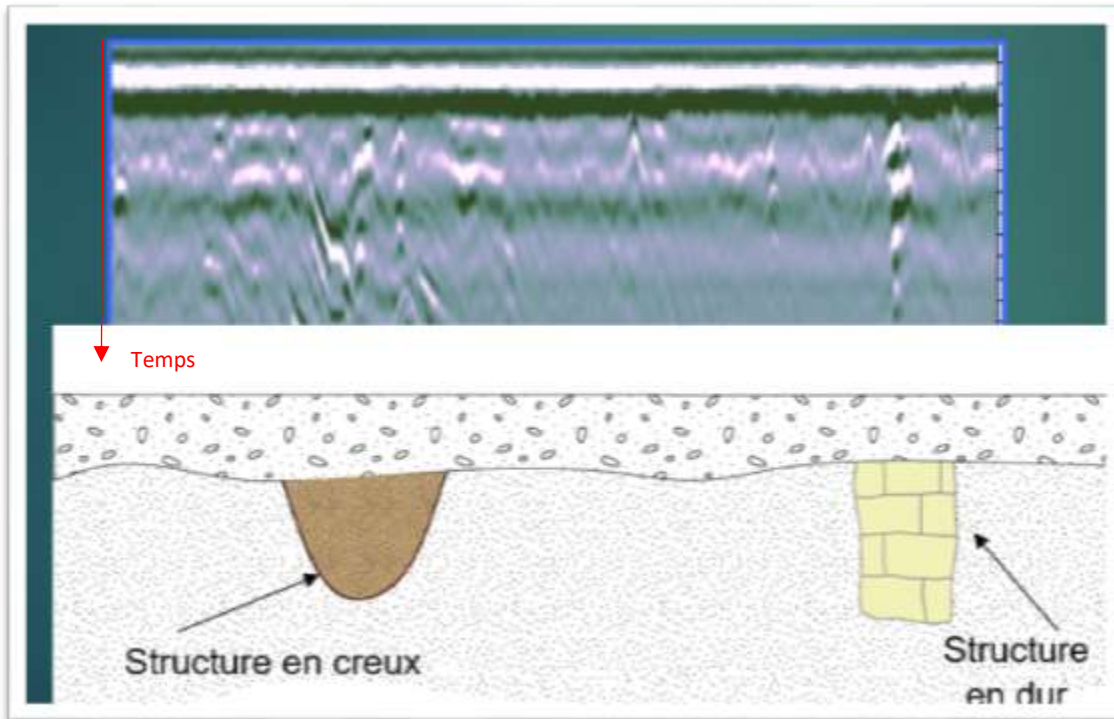


Fig. 7 Radargramme (section verticale) au-dessus de structures archéologiques enfouies : le long du profil les échos sont enregistrés en fonction du temps/ profondeur

Dans la mesure manuelle, l'opérateur tire les deux antennes radar sur le sol. A partir de 2010, nous avons tracté les antennes radar avec un quad et synchronisé les mesures avec un GPS RTK afin d'augmenter la vitesse d'acquisition. Mais le principal gain de temps est la possibilité de multiplier le nombre d'antennes (jusqu'à 32 antennes actuellement) que l'on peut tirer simultanément, divisant le temps d'acquisition par le même facteur. Avec ces dispositifs multi-antennes, il devient possible de prospecter 1ha en moins de 2 heures. Néanmoins, ces dispositifs multi-antenne restent très coûteux et complexes à tracter. De plus le temps de traitement est très long et nécessite des capacités de calcul importantes. Le choix entre un système mono-antenne ou pluri-antenne résulte donc de beaucoup de facteurs différents.

La carte suivante présente une prospection radar-sol effectuées à titre de démonstration pour la cellule archéologique du département de l'Eure (S. Bertaudière, MADE, CG Eure) sur le site gallo-romain du Vieil-Evreux. Elle a été faite sur la même zone du *fanum* que la prospection électrique de la figure 4 (mais sur une zone plus petite pour les raisons expliquées avant). Elle représente en densité de gris, l'énergie des réflecteurs sélectionnés pour une profondeur moyenne de 1,28m, le blanc représentant les structures les plus réfléchissantes. On retrouve bien le plan du *fanum* déjà découvert par la prospection électrique mais avec une définition spatiale bien meilleure. Des coupes à d'autres profondeurs (non montré ici) permettent de définir la profondeur et la puissance de ces murs.



Fig. 8 Cartographie radar-sol (zone en noir et blanc) pour une profondeur moyenne de 1,28m incrustée sur une photographie aérienne au nord des thermes gallo-romains du site du Vieil-Evreux (Eure) : mise en évidence des murs d'un temple celtique. Les murs apparaissent comme des réflecteurs (blanc) bien différenciés (demande cellule MADE du CG Eure , prospection tractée StreamX Geostudi).

Conclusion

En conclusion, la géophysique est un des outils de prospection à la disposition de l'archéologue. C'est un des seuls outils, comme la radiographie pour le médecin, qui permette de 'voir' directement dans le sol sans l'ouvrir. Pour l'archéologue, la géophysique permet de mieux cibler ses fouilles. Pour l'aménageur et le prescripteur, la géophysique permet de mieux connaître le risque archéologique et ce le plus tôt possible. L'archéo-géophysicien doit être sollicité en coordination avec les autres spécialistes.

Pour aller plus loin ... (par ordre de complexité):

- Des résultats de prospections géophysiques sur plusieurs sites archéologiques sont visualisables avec un simple navigateur sur le site suivant développé par le laboratoire AOROC de l'ENS: www.chronocarto.eu
 - Livre : « La prospection ». Collection « Archéologiques », dirigée par A. Ferdière, eds. Errance, 2006, ISBN 2-87772-328-3, 248p.
 - Livre : « Aménagement du territoire et archéologie préventive ». Territorial Editions, N° 732, A. Audebert et T. Vigreux, Juillet2012, ISBN13:978-2-8186-0394-9, 232p.
 - Manuel en ligne: EAC Guidelines for the Use of Geophysics in Archaeology. EAC Guidelines 2, A. Schmidt *et al.*, téléchargeable sur le site de l'ISAP: <http://www.archprospection.org/eacguidelines>.
 - Livre: "Archaeological prospecting and Remote Sensing", Nov. 1990, Cambridge Univ. Press, ISBN 10:052132050X, 692p.
-