L'utilisation des instruments de mesure portables en archéologie préventive

Guillaume Hulin, Sylvie Eusèbe

Inrap, Direction scientifique et technique – 121, rue d'Alésia, 75014 Paris, France

Avec près de 2 000 opérations d'archéologie préventive gérées par l'Inrap chaque année (environ 1 800 diagnostics et 200 fouilles), l'utilisation d'outils de mesure directement sur le terrain est un enjeu majeur pour l'institut, tant pour les aspects scientifiques que pour l'élaboration des stratégies de fouille. De fait, si dans de nombreux cas, les mesures *in situ* ne peuvent se substituer intégralement aux mesures faites en laboratoire, elles permettent *a minima* de mieux cibler les problématiques archéologiques dès la phase terrain et d'aiguiller au mieux la conduite de l'opération. Les analyses géophysiques et géochimiques constituent des applications évidentes d'archéométrie de terrain utilisées ou susceptibles d'être utilisées par l'Inrap. À celles-ci on peut y ajouter la restitution tridimensionnelle par les techniques de lever laser ou de photogrammétrie. Les contraintes liées à l'archéologie préventive nécessitent, dans certains cas, d'adapter ces différents outils et les protocoles associés. Des progrès techniques et technologiques importants ont été effectués ces dernières années et permettent non seulement de mieux répondre aux questionnements de l'archéologue mais aussi de faire émerger de nouvelles applications.

1 Des instruments portables par définition : les appareils de mesures géophysiques

Parmi les instruments portables, ceux permettant de réaliser des mesures géophysiques occupent une place à part puisque, par définition, ils ont été conçus pour être employés sur le terrain. Ainsi, la notion de portabilité ne correspond pas à un transfert du laboratoire vers le terrain, mais plutôt à une adaptation technique pour que ces instruments répondent au mieux aux conditions de terrain.

À l'Inrap, les applications de la géophysique sont multiples, allant de la détection / caractérisation de vestiges archéologiques à la recherche d'entités géomorphologiques et

ce à différentes échelles (Hulin et Simon, 2012). Que ce soit en diagnostic ou en fouille, l'institut préconise l'utilisation de la géophysique uniquement lorsqu'une problématique scientifique et/ou technique est clairement identifiée par l'archéologue. Cette approche nécessite des connaissances préalables sur le contexte de l'étude (aussi bien archéologiques – que recherche-t-on ? – que pédologiques – existe-t-il des contrastes géophysiques permettant de détecter les vestiges recherchés ?). Cette démarche permet d'optimiser l'intervention en ciblant à la fois la ou les techniques à employer ainsi que les zones pertinentes à étudier. La plupart des études réalisées par l'Inrap concernent des surfaces relativement restreintes (de quelques centaines de m^2 à quelques ha) contrairement aux approches extensives réalisées souvent à l'aveugle – donc sans connaissance préalable – dont les bénéfices en termes scientifiques sont souvent limités en regard de l'investissement engagé (Hulin, 2016).

Cette approche que l'on peut qualifier de « raisonnée » nécessite souvent l'emploi de matériels légers, maniables, facilement transportables et pouvant s'adapter facilement et rapidement aux conditions de terrain. Parmi ces applications, les études réalisées sur surfaces décapées, donc directement sur les niveaux d'apparition des vestiges, constituent un cas à part entière où la notion de portabilité prend tout son sens puisque l'impact sur les vestiges doit y être minime. Il s'agit ici d'apporter des informations sur les horizons archéologiques, le plus souvent par le biais de paramètres magnétiques. La mesure de la susceptibilité magnétique (Figure 1) est la plus évidente et pourra nous renseigner notamment sur les zones de chauffe et les zones de travail du fer. De ces informations, un protocole de fouille et de prélèvements adapté pourra être décidé. Il en résulte un gain scientifique et opérationnel tout particulièrement en ce qui concerne les problématiques paléométallurgiques comme cela a pu être démontré sur le projet du Canal Seine-Nord Europe (Hulin *et al.*, 2014 ; Jagou et Hulin, 2016).



Figure 1 – Mesure de la susceptibilité magnétique sur des niveaux archéologiques à Entrains-sur-Nohain (58). © S. Venault, Inrap.

Lorsque l'on parle de portabilité, on pense bien évidemment à la réduction du poids des appareils et de leur taille. La miniaturisation des capteurs, bien qu'évidente, ne constitue pas, à l'heure actuelle, la principale source d'optimisation de portabilité des instruments géophysiques. Les principes physiques sur lesquels se fondent certaines

méthodes font qu'il est souvent impossible de réduire la taille des capteurs (exemple des appareils électromagnétiques basse fréquence où la profondeur d'investigation est définie par la distance entre les bobines émettrices et réceptrices ainsi que par leur configuration (Tabbagh, 1986)). On pourra toutefois noter l'apparition de nouveaux capteurs de mesure du champ magnétique dix fois plus petit que les capteurs précédents mais dont le coût, encore trop élevé, limite leur emploi en archéologie (capteurs MFAM à pompage optique développés par Geometrics (Prouty *et al.*, 2015)). Comme souvent, ce sont le développement et la commercialisation de tels capteurs dans d'autres domaines (militaire notamment) qui permettront, à terme, une baisse des coûts et donc leur utilisation en archéologie.

L'intérêt d'une telle miniaturisation réside également dans la possibilité de mettre en parallèle un plus grand nombre de capteurs permettant d'augmenter la largeur couverte en un seul passage et/ou d'augmenter l'échantillonnage (exemple des systèmes multi-antennes radar avec des distances inter capteur inférieures à 10 cm). Les systèmes multi-capteurs constituent donc un point important en termes opérationnels puisqu'ils permettent de balayer une plus large surface en un seul passage avec une haute résolution nécessaire à la cartographie des structures archéologiques les plus fines.

Des améliorations significatives concernant les centrales d'acquisition et les systèmes de visualisation sont également à noter. Ceux-ci ont connu une réduction importante de leur poids ces dernières années avec, notamment, l'apparition des tablettes PC et des smartphones de terrain qui, à eux seuls, permettent souvent de gagner plusieurs kilogrammes de charge utile, tout en gagnant en ergonomie de travail (Figure 2 et 3).



Figure 2 – Tablette PC permettant l'acquisition des données radar © G. Hulin, Inrap

Une des avancées principales de ces dix dernières années réside également dans l'amélioration notable des systèmes de positionnement. Que ce soit avec un système GNSS ou bien avec une station totale robotisée (Leckebusch, 2005 ; Trinks *et al.*, 2009 ; Bruniaux *et al.*, 2017), il est dorénavant aisé d'acquérir des données avec un positionnement centimétrique en temps réel (Figure 3). Une mesure géophysique, aussi précise soit elle, n'aura de sens que si elle est parfaitement localisée. La qualité du géoréférencement et sa rapidité constituent véritablement des éléments-clés à considérer pour

l'obtention d'une cartographie géophysique de qualité. Ici aussi, une miniaturisation accompagnée d'une démocratisation importante de ces systèmes a permis une plus grande facilité d'utilisation. Dans certains cas, une roue codeuse ou un radar doppler peut être combiné pour pallier certaines difficultés de positionnement (présence d'obstacles à la réception des signaux de positionnement). Ces outils, qui permettent d'obtenir la distance parcourue et de déclencher les mesures à intervalle régulier, sont maintenant très souvent intégrés à l'appareillage géophysique pour optimiser l'échantillonnage (Flageul *et al.*, 2013). De manière générale, un positionnement précis des données en temps réel permet d'augmenter la qualité des données mais également de gagner un temps conséquent lors de la phase de traitement. L'obtention des résultats est donc plus rapide, ce qui constitue un point essentiel en archéologie préventive où les contraintes de temps sont particulièrement fortes.

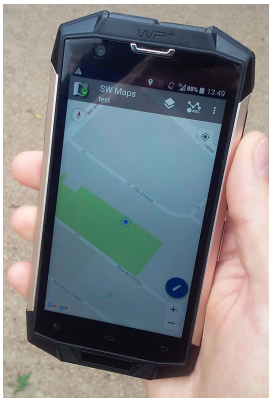


Figure 3 – Smartphone permettant l'acquisition des données GNSS et un positionnement centimétrique en temps réel via une communication GSM vers un réseau de bases GNSS © G. Hulin, Inrap

L'utilisation de vecteurs d'acquisition tels que les drones peut permettre de s'affranchir de bon nombre de contraintes lors de l'acquisition géophysique. Cette approche est en cours de développement pour la prospection magnétique (Gavazzi *et al.*, 2016) et électromagnétique basse-fréquence [1] avec, pour objectif principal, un gain en termes de temps d'acquisition, de fatigabilité de l'opérateur et de non-destruction des surfaces à prospecter (notamment pour les parcelles en culture). Si l'idée parait intéressante, des difficultés d'utilisation sont encore présentes (hauteur et attitude du capteur, perturbations des mesures par le drone, autonomie des batteries) et génèrent un niveau de bruit instrumental trop élevé pour une détection fiable des vestiges archéologiques. Malgré cela, des progrès notables sont clairement à attendre dans ce domaine permettant d'entrevoir, à moyens termes, une nouvelle manière de réaliser des prospections géophysiques.

1. http ://www.geophex.com/images/Guardian%20Eagle%20Helicopter%20flying%20with%20GEM%202%20electromagnetic%20sensor%20onboard.pdf [consulté le 30/11/2018].

2 De nouveaux instruments portables pour la modélisation 3D

Au milieu des années 1990, l'utilisation de données 3D débute avec la constitution du métier de topographe à l'Afan (Association pour les fouilles archéologiques nationales, entité qui a précédé l'Inrap, né quant à lui en 2001). Puis les premiers levers automatiques en 3D par lasergrammétrie font leur apparition quelques années plus tard et sont utilisés pour garder la mémoire de vestiges exceptionnels. Par exemple en 1999, la société MENSI réalise le scanner des deux tombes à char gauloises découvertes à Roissy-en-France (lieu-dit de la Fosse Cotheret) lors des fouilles entreprises dans le cadre de l'extension de l'aéroport Charles-de-Gaulle. Au début des années 2000, des topographes de l'Inrap modélisent, à l'aide de la topographie, des structures archéologiques dont l'organisation est particulièrement difficile à saisir sans leur visualisation en volume. C'est le cas notamment des éléments en bois formant quais et pontons en bord de Seine (fouilles du quai Branly à Paris) ou de Marne (Chelles, fouilles 30-32 rue Gustave Nast) (Raymond et Belarbi, 2009). Au tournant des années 2010, on fait appel de plus en plus souvent aux entreprises qui proposent des levers lasergrammétriques (terrestres ou aéroportés). Le scanner terrestre est utilisé, en particulier, dans le cas de structures irrégulières, exiguës ou enterrées (par exemple le souterrain fouillé au Bois d'Ormes, à Ormes, Loiret). Quant au laser aéroporté, les données obtenues résultent souvent d'une commande faite par l'aménageur pour ses propres besoins opérationnels. C'est le cas des modèles numériques de terrain (MNT) qui rendent compte du relief sur les grands travaux (par exemple la LGV Bretagne-Pays-de-la-Loire, le gazoduc Arc-de-Dierrey ou encore le projet Cigéo de l'Andra à Bure). Ces MNT sont alors utilisés lors des phases de diagnostics archéologiques afin de repérer d'éventuelles structures aux reliefs ténus. Actuellement, les levers LiDAR sur de plus petites surfaces (de l'ordre de la dizaine d'hectares) tendent à se développer avec l'apparition des drones et la réduction du poids des capteurs embarqués. Ces mesures restent, pour le moment, minoritaires et sont réalisées par des prestataires externes à l'institut.

Parallèlement à la lasergrammétrie, des topographes et des archéologues de l'Institut expérimentent la photogrammétrie [2]. Le succès de cette technique est dû à sa relative accessibilité, à l'investissement matériel modéré qu'elle requiert et, comme le soulignent de nombreux archéologues, à sa rapidité de réalisation. Les nuages de points ainsi obtenus et les orthophotoplans qui en sont issus se multiplient, notamment en contextes bâti et funéraire. Depuis 2016 la mise en œuvre de cette technique par les agents de l'institut est encouragée. Des formations internes voient le jour (initiation à la photogrammétrie numérique, utilisation des logiciels PhotoScan, MicMac et CloudCompare), du matériel (PC dédié, appareil photographique numérique) et des logiciels spécifiques (PhotoScan) sont mis à disposition des archéologues.

Indépendamment de la technique d'acquisition, le modèle 3D est apprécié pour son rôle documentaire et conservatoire. Il est également une aide à la visualisation (point de vue inaccessible dans la réalité, juxtaposition de vestiges modélisés non visibles

2. Le n° 34 de la revue de l'Inrap « Archéopages » présente un dossier sur des retours d'expériences de modélisation 3D : https ://journals.openedition.org/archeopages/371 [consulté le 30/11/2018].

simultanément dans la réalité), ainsi qu'une aide aux choix de fouille et à l'étude. Il est notamment un support de mémoire en permettant de visualiser le terrain ou l'objet, alors que celui-ci est détruit ou inaccessible. *A priori* tous les vestiges peuvent être concernés par une modélisation, du plus petit (le dé à jouer du site d'Evena à Esvres-sur-Indre), au plus vaste, un bâtiment (parmi de très nombreux exemples citons l'Aître Saint Maclou à Rouen [3]), un chantier archéologique (les fouilles autour de la cathédrale du Mans [4]).

Les progrès, en termes de portabilité et de simplification d'utilisation, qu'entraînent les technologies numériques sont parfaitement illustrés par l'essor de la photogrammétrie en archéologie préventive. En la rendant « portable » et « abordable », le numérique la banalise : le traitement des clichés et l'impression des orthophotographies peuvent désormais être réalisés sur les chantiers. La photogrammétrie devient un outil parmi d'autres à la disposition de l'archéologue, et s'intègre au déroulement de la fouille : dès qu'un relevé est nécessaire, on réalise un modèle 3D, et surtout les orthophotos qui en sont issues. Celles-ci sont annotées en présence du vestige, fournissant ainsi un support d'enregistrement graphique et textuel qui tend à se substituer à la minute de terrain traditionnelle (Figure 4).

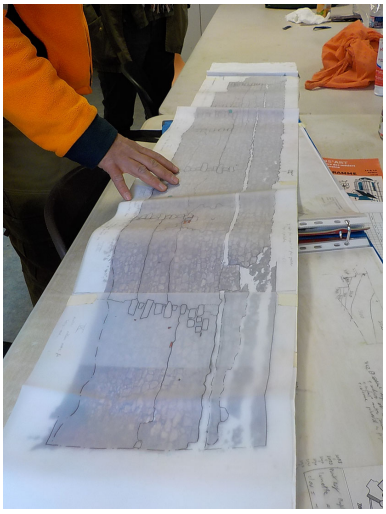


Figure 4 – Analyse d'une maçonnerie à l'aide de l'orthophoto de son élévation, fouilles du chevet de la cathédrale du Mans, responsable d'opération S. Augry. © S.Eusèbe, Inrap.

Elles sont également intégrées à un logiciel de SIG pour dresser le plan des vestiges, traiter les données associées, et réaliser les illustrations portant l'interprétation de l'archéologue (Figure 5).

3. Conférence d'Elen Esnault, Inrap, dans le cadre du Séminaire scientifique et technique Inap-Inria/IRISA « Imagerie numérique et 3D », Rennes juin 2018, voir la vidéo de la conférence ici : https ://www.inrap.fr/les-nouvelles-techniques-de-releves-appliquees-l-archeologie-du-bati-et-l-13739 [consulté le 30/11/2018].

4. https ://www.inrap.fr/les-fouilles-des-jardins-de-la-cathedrale-du-mans-13569 [consulté le 30/11/2018].

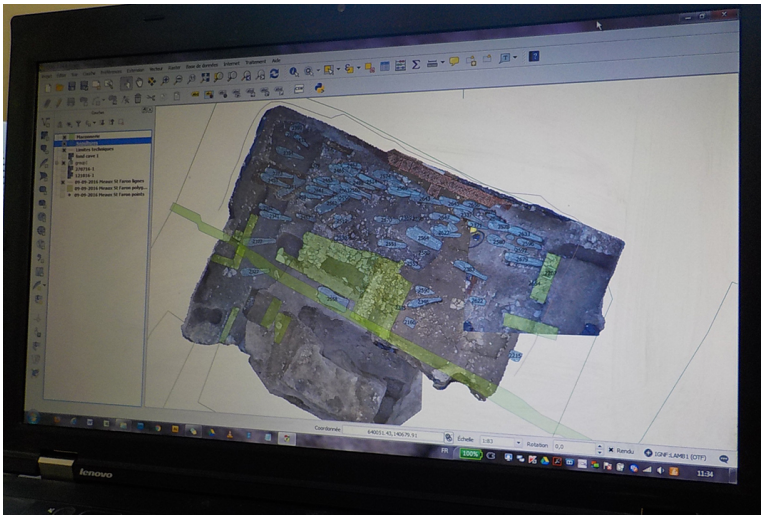


Figure 5 – Intégration d'orthophotos dans un SIG pour tracer le plan des vestiges, chantier du 62-72, rue Saint-Faron à Meaux, responsable d'opération : D. Couturier, photogrammétrie et SIG : R. El Hajaoui. © S .Eusèbe, Inrap.

On constate donc que l'utilisation des technologies numériques de captation automatique de données 3D directement sur le chantier archéologique s'accroît rapidement. Si le recul manque encore pour synthétiser ces nouveaux usages, en abordant désormais l'intégration de ces technologies dans le processus de fouille et d'étude, séminaires et colloques [5] livrent une image de plus en plus précise des évolutions en cours tant en termes d'organisation du travail qu'en matière de résultats scientifiques.

3 De nouvelles méthodes à mettre en œuvre sur le terrain

De nouveaux champs sont à explorer dans le domaine de la mesure de terrain en archéologie. Parmi ceux-ci on peut citer les techniques d'imagerie thermique et multi- / hyper-spectrale. Les développements récents en micro-électronique permettent dorénavant d'embarquer des capteurs performants sur drone facilitant considérablement leur emploi. Ils sont, à l'heure actuelle, principalement utilisés dans une optique de détection de site sur de grandes surfaces (Poirier *et al.*, 2013 ; Casana *et al.*, 2014).

Bien que ces techniques soient connues de longue date (Tabbagh, 1977 ; Comer et Harrower, 2013), les capteurs étaient généralement embarqués sur des avions ou des satellites générant, de fait, des coûts élevés et une très faible flexibilité opérationnelle. Les capacités techniques actuelles, aussi bien en termes de caméras que de drones, laissent présager des applications à une échelle plus réduite, notamment sur surfaces décapées où des informations invisibles à l'œil nu peuvent être collectées et aider l'archéologue à la lecture des horizons difficiles à percevoir (par exemple dans le cas des terres noires ou des sites peu contrastés). Par ce type d'approche, il devient

5. : Le récent séminaire, organisé par l'Inrap et l'Inria-IRISA, intitulé « Imagerie numérique et 3D », en est un bon exemple, https ://www.inrap.fr/archeologie-imagerie-numerique-et-3d-13628 [consulté le 31/07/2018].

possible d'appréhender différemment le site, dès la phase du décapage, en combinant judicieusement certaines longueurs d'ondes du spectre lumineux. Potentiellement, des ensembles cohérents, pourtant difficiles à percevoir à l'œil nu, peuvent être identifiés permettant ainsi de conduire au mieux l'opération de fouille. Un projet de recherche est actuellement en cours à l'Inrap pour évaluer l'intérêt de ces techniques d'imagerie.

Enfin, les capteurs spectrométriques portables (XRF, LIBS) sont également à évaluer pour tenter de répondre plus efficacement aux problématiques scientifiques et opérationnelles. Des applications évidentes pour la caractérisation des objets sont d'ores et déjà largement utilisées (*cf.* articles dans ce volume), mais des applications directes sur le terrain peuvent être entrevues notamment pour des mesures géochimiques *in situ*. Il pourrait, par exemple, être envisagé d'obtenir des informations rapidement sur les variations en phosphore qui nous renseignent sur la présence d'animaux ou bien encore la détection de sépultures comme ce fut le cas pour un tumulus de l'âge du Bronze à Brest ou une fosse néolithique à Pléchatel (Pustoc'h *et al.*, 2015).

Conclusion

Quelles que soient les thématiques abordées ici, les apports de la portabilité en termes scientifiques et opérationnels sont réels et conséquents. Certains verrous technologiques sont désormais levés et permettent ainsi de répondre plus efficacement aux problématiques posées par l'archéologue dès la phase terrain. D'une manière générale, les technologies numériques apportent un gain de temps et augmente la quantité de données enregistrées. Concernant la géophysique et les techniques de télédétection telles que l'imagerie thermique ou multi- / hyper-spectrale, les évolutions récentes permettent des mesures plus précises, plus rapides et avec des configurations d'appareil permettant de s'adapter plus facilement aux différentes conditions de terrain. De nouvelles approches sont désormais possibles notamment au moment de la fouille pour aider l'archéologue dans sa démarche. La plus grande facilité d'utilisation des appareils de terrain et des techniques par la micro-informatique rend accessible des domaines jusqu'à présent réservés à des spécialistes.

L'introduction de ces nouveaux outils dans la chaine opératoire n'est pas sans conséquences. Des tâches sont réduites ou disparaissent, d'autres se développent, et cela modifie les métiers des différents intervenants. Mais avant tout, les domaines en question ont des règles, qui peuvent certes s'adapter et évoluer, mais que l'on ne peut ignorer. La plus grande accessibilité des appareils de mesure, doit être encadrée pour ne pas être contreproductive. Pour l'Inrap, l'enjeu majeur est donc d'accompagner cette démocratisation en transmettant les bonnes pratiques afin de ne pas entrainer une baisse de qualité des données produites et de maintenir une cohérence dans la collecte et le traitement de ces données. Cela passe notamment par la mise en place de plans de formation et par la délimitation claire du périmètre des tâches entre les différents acteurs.

Références

Bruniaux G., Mathé V., Lévêque F., Camus A., Ard V., 2018 - Data processing chain for high spatial resolution magnetic survey : Application on the Neolithic site of le Pontet (Charente-Maritime, France), *Archaeological Prospection*, 25, p. 3-16.

Casana J., Kantner J., Wiewel A., Cothren J., 2014 - Archaeological aerial thermography : a case study at the Chaco-era Blue J community, New Mexico, *Journal of Archaeological Science*, 45, p. 207-219.

Comer D. C., Harrower M. J., 2013 - Mapping Archaeological Landscapes from Space, Springer, New York, 276 p.

Raymond P., Belarbi M., 2009 - *Modélisation de structures archéologiques à partir de données topographiques*, *in* Virtual Retrospect 2009, Collection Archéovision, vol. 4, Ausonius Éditions : http ://archeovisio n.u-bordeaux3.fr/pdf/vr09_pdf/09_Raymond.pdf [consulté le 31/07/2018].

Flageul S., Dabas M., Thiesson J., Rejiba F., Tabbagh A., 2013 - First in situ tests of a new electrostatic resistivity meter, *Near Surface Geophysics,* 11, p. 265-273.

Gavazzi B., Le Maire P., Munschy M., Dechamp A., 2016 - Fluxgate vector magnetometers : A multisensor device for ground, UAV, and airborne magnetic surveys. *Leading Edge*, Society of Exploration Geophysicists, 35 (9), p.795-797.

Hulin G., 2016 - L'application de la géophysique sur le canal Seine-Nord-Europe, *Archéopages*, Hors-série n°4, p. 101-105.

Hulin G., Jagou B., De Muylder M., Henton A, Lamotte D., Lefèvre P., Rousseau A., 2014 - Reconnaître et caractériser les zones de forge sur surface décapée : apport de la géophysique à l'étude paléométallurgique. *Archéopages*, 39, p. 90-99.

Hulin G., Simon F.-X., 2012 - Geophysics and preventive archaeology in France : new interdisciplinary issues. *First Break*, 30, p. 67-71.

Jagou B., Hulin G., 2016 - Apport de la géophysique à l'étude paléométallurgique : l'exemple de la forge d'Eterpigny-Barleux (Somme), actes de la table ronde CORPUS : étude du mobilier métallique et de l'instrumentum, *Revue Archéologique du Loiret*, Hors-série n°3, p. 9-12.

Leckebusch J., 2005 - Precision real-time positioning for fast geophysical prospection, *Archaeological Prospection*, 12, p. 199-202.

Prouty M. D., Tchernychev M., Mhaskar R. R., 2015 - Applications of micro-fabricated atomic magnetometers. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, p. 469-472.

Poirier N., Hautefeuille F., Calastrenc C., 2013 - Low altitude thermal survey by means of an automated unmanned aerial vehicle for the detection of archaeological buried structures. *Archaeological Prospection*, 20 (4), p.303-307.

Pustoc'h F., Querré G., Le Bannier J.-C., 2015 - Apports des analyses chimiques in situ par spectrométrie de fluorescence X portable (p-XRF) à l'étude des occupations pré- et protohistoriques de l'ouest de la France. Journée du « CReAAH » Archéologie Archéosciences Histoire, Rennes 21 mars 2015, p. 31.

Tabbagh A., 1977 - Prospections thermiques et électriques. *Gallia préhistoire,* 20(1), p. 271-280.

Tabbagh, A., 1986 - Applications and advantages of the Slingram electromagnetic method for archaeological prospecting, *Geophysics*, 51, p. 576-584.

Trinks I., Gustafsson J., Emilsson J., Gustafsson C., Johansson B., Nissen J., 2009 - Efficient, large-scale archaeological prospection using a true 3D GPR array system, *ArcheoSciences*, 33 (suppl.), p. 367-370.