



HAL
open science

Possibilités offertes par l’outil géophysique

Alain Tabbagh, Christian Camerlynck, Michel Dabas

► **To cite this version:**

Alain Tabbagh, Christian Camerlynck, Michel Dabas. Possibilités offertes par l’outil géophysique. Archéologie du bâti. Aujourd’hui et demain, 2022, 10.4000/books.artehis.27347 . hal-03906072

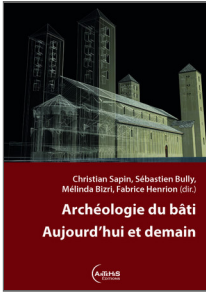
HAL Id: hal-03906072

<https://hal.science/hal-03906072v1>

Submitted on 19 Dec 2022

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.



Christian Sapin, Sébastien Bully, Mélinda Bizri et Fabrice Henrion (dir.)

Archéologie du bâti. Aujourd'hui et demain

ARTEHIS Éditions

Possibilités offertes par l'outil géophysique

Geophysical tool capabilities

Alain Tabbagh, Christian Camerlynck et Michel Dabas

DOI : 10.4000/books.artehis.27347

Éditeur : ARTEHIS Éditions

Lieu d'édition : Dijon

Année d'édition : 2022

Date de mise en ligne : 7 juin 2022

Collection : Monographies et Actes de colloques

EAN électronique : 9782958072643



<http://books.openedition.org>

Référence électronique

TABBAGH, Alain ; CAMERLYNCK, Christian ; et DABAS, Michel. *Possibilités offertes par l'outil géophysique* In : *Archéologie du bâti. Aujourd'hui et demain* [en ligne]. Dijon : ARTEHIS Éditions, 2022 (généralé le 13 juin 2022). Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/artehis/27347>>. ISBN : 9782958072643. DOI : <https://doi.org/10.4000/books.artehis.27347>.

Ce document a été généré automatiquement le 13 juin 2022.

Possibilités offertes par l'outil géophysique

Geophysical tool capabilities

Alain Tabbagh, Christian Camerlynck et Michel Dabas

1. Problématique

- 1 La géophysique est l'étude de la Terre à partir de ses propriétés physiques, elle peut porter aussi bien sur la Terre dans son ensemble que sur des surfaces ou des profondeurs limitées. Tel est le cas en archéologie où les profondeurs considérées ne dépassent pas la dizaine de mètres et les surfaces quelques kilomètres carrés au maximum. Cette approche s'insère particulièrement bien dans le cadre de la prospection archéologique où elle permet une investigation dans les trois dimensions. Plusieurs impératifs limitent cependant le choix des propriétés physiques utilisables : les mesures ne doivent en rien modifier le milieu, elles doivent être reproductibles et rapides, mais aussi montrer une variabilité suffisante permettant de caractériser les différents milieux présents.
- 2 À partir de la fin des années cinquante la mise en pratique de la prospection géophysique en archéologie s'est considérablement étendue : trois propriétés se sont révélées particulièrement intéressantes : la résistivité électrique (mesurée aussi bien par la méthode électrique que par la méthode électrostatique ou les méthodes électromagnétiques à basse fréquence, EMI), la susceptibilité magnétique (méthodes magnétiques et EMI) et enfin la permittivité diélectrique (Radar-sol en haute fréquence). On peut, pour être plus complet, citer aussi l'analyse de la vitesse de propagation des ébranlements mécaniques (qui connaît de larges applications en contrôle non destructif), la cartographie de la température de surface (appelée à se développer du fait de nouveaux capteurs et nouvelles caméras) ou la gravimétrie (bien adaptée à la détection de vides dont les volumes sont importants).
- 3 Dans le texte ci-après, on procède d'abord à un rappel des principes des méthodes et des conditions de leur mise en œuvre. On présente ensuite plusieurs exemples qui

répondent à une définition large de l'archéologie du bâti : elle porte sur tous les bâtiments, ou parties de bâtiments, même totalement enfouis, quelles que soient leurs fonctions (habitation, défense...) à condition que ces bâtiments soient 'construits' en pierre, bois ou autre matériau 'de construction' en éliminant les structures en terre à vocation de simple délimitation de l'espace. Pour faciliter la lecture on distinguera les prospections réalisées en milieu 'ouvert' (parcelles cultivées, prairies) de celles qui doivent l'être en milieu 'urbain'. Dans ce cas, en effet, plusieurs contraintes doivent impérativement être prises en compte : (1) l'exiguïté des surfaces accessibles et, plus généralement, les contraintes physiques ou réglementaires limitant le déploiement des systèmes de mesures ainsi que l'extension des cartographies, (2) l'état de surface du sol (qu'il faut éviter d'altérer), (3) l'existence de nombreuses, et potentiellement intenses, sources de bruit électromagnétique ou mécanique (mais ces bruits peuvent éventuellement être utilisés comme sources), (4) la présence en surface ou immédiatement sous la surface de nombreux objets ou structures perturbant les mesures (ce que l'on peut appeler un bruit 'géophysique'), (5) on doit enfin être particulièrement attentif à l'acceptation sociale des travaux.

2. Principales méthodes

2.1. Prospection électrique

- 4 Dans cette méthode un courant électrique est injecté dans le sol à partir de deux électrodes (deux piquets métalliques souvent notés A et B) et deux autres électrodes (M et N) permettent de mesurer la différence de potentiel créée par cette circulation. La disposition géométrique des électrodes commandant l'épaisseur de terrain prise en compte dans la mesure, on peut, en déplaçant un même dispositif, cartographier simultanément les variations latérales de la résistivité et changer les profondeurs d'investigation en modifiant les distances entre électrodes. Comme le montre la figure 1, il est possible avec des dispositifs à roues dentées d'effectuer des mesures 'en continu' sur plusieurs épaisseurs du terrain simultanément¹. Cette méthode est bien adaptée aux mesures sur champs et prairies.

Evolution des outils, Prospection électrique

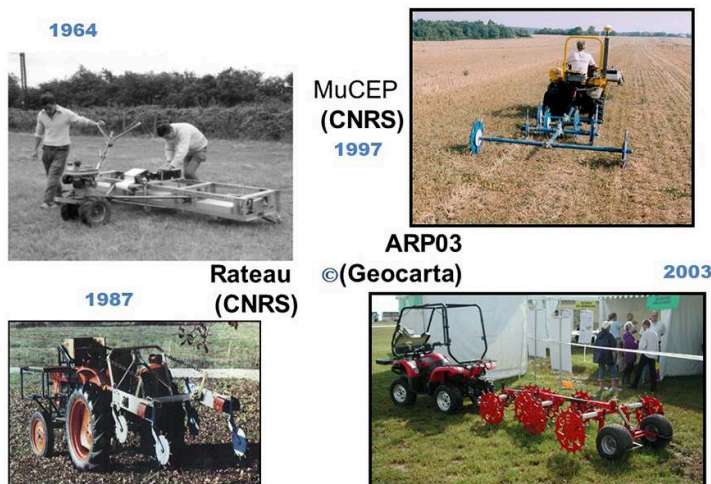


Fig. 1. Evolution des dispositifs de prospection électrique mobile à roues dentées permettant une cartographie rapide sur plusieurs profondeurs d'investigation.

2.2. Prospection électrostatique

- 5 Cette méthode, utilisée à partir du début des années 90², est une généralisation de la précédente où les électrodes métalliques sont remplacées par des pôles électrostatiques (plaques métalliques enrobées d'un isolant). On injecte ici le courant à partir d'un condensateur ouvert et on mesure la différence de potentiel à partir d'un autre (ou de plusieurs autres) condensateur(s) ouvert(s). Elle est bien adaptée aux mesures sur des surfaces isolantes comme les pavages et le bitume (Fig. 2), voire sur les pelouses, et, à l'échelle décimétrique, aux mesures sur les murs et éléments du bâti.

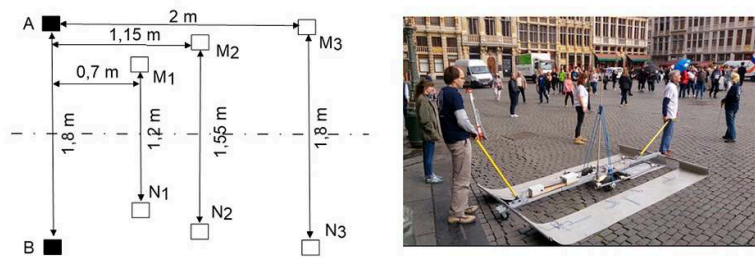


Fig. 2. Dispositif de prospection électrostatique utilisé en milieu urbain. Les pôles sont des tissus en fil de cuivre placés sur les tapis de PVC et disposés selon le schéma. Les mesures portent simultanément sur trois profondeurs d'investigation. Appareil utilisé pour la prospection de la 'Grand-Place' de Bruxelles.

2.3. Radar-sol

- 6 Une impulsion électromagnétique brève (une à quelques nanosecondes) est émise par une antenne, elle se réfléchit sur les interfaces présentes dans le sous-sol, le signal réfléchi est enregistré par une ou plusieurs antennes réceptrices. Basée sur la propagation d'une onde électromagnétique haute fréquence cette méthode permet de restituer une image détaillée du sous-sol mais elle demande une maille de mesure très fine. Ceci a conduit au développement de systèmes de mesure multi-antennes. La figure 3 présente un radar-sol multi-antennes à 15 couples émission/réception, il permet, compte tenu de la fréquence, une résolution centimétrique.



Fig. 3. Radar-sol (Ground Penetrating Radar) comprenant 15 couples d'antennes émettrice/réceptrice espacés de 12 cm assurant une fauchée de 1,68 m. La fréquence centrale est de 200 MHz. Photographie de l'appareil lors de son utilisation sur la 'Grand-Place' de Bruxelles.

2.4. Prospection magnétique

- 7 En prospection magnétique, on cartographie les variations latérales de l'aimantation totale des matériaux présents dans le sous-sol. Très perturbée par la présence d'objets en métal ferreux, elle n'est pas adaptée à la prospection en milieu urbanisé, mais efficace pour la détection en milieu ouvert de structures en pierre de faible susceptibilité magnétique comme les calcaires ou de forte susceptibilité comme les briques.

2.5. Prospection électromagnétique à basse fréquence

- 8 Dans la gamme de fréquence [5 kHz - 20 kHz], les appareils comprenant une bobine émettrice et une ou plusieurs bobines réceptrices permettent de cartographier à la fois la résistivité électrique et la susceptibilité magnétique. Un seul opérateur peut facilement les mettre en œuvre (Fig. 4).

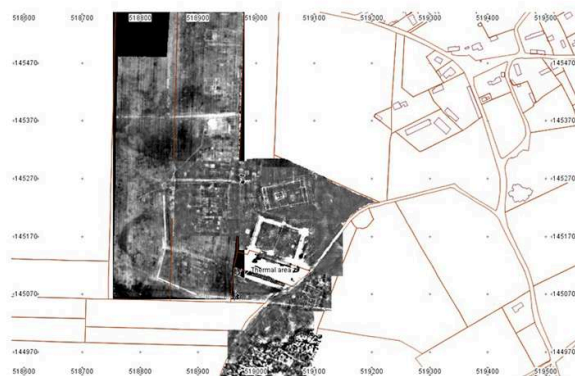


Fig. 4. Electronique et bobines du prototype CS60 et mode d'utilisation sur le terrain du CMD 'mini-explorer' à 3 réceptrices.

3. Exemples sur des ensembles bâtis en milieu ouvert

- 9 Les exemples de prospections ayant permis de relever le plan général d'une cité ou d'un simple bâtiment sont nombreux, nous en présentons ici deux. Le premier³ est le site gallo-romain de Vieil-Evreux (Eure) qui a servi de site test pour les essais de l'ARP (les villes médiévales étant le plus souvent sous les villes actuelles à l'exception de quelques cas dont celui de la ville de Théroüanne en cours d'étude). La figure 5 montre à côté des thermes fouillés la présence d'un fanum et l'extension de la ville (voies, quartiers d'habitation, aqueducs) vers le nord et l'ouest.

Cartographie électrique Site Gallo-Romain de Vieil-Evreux (Eure)



1

Fig. 5. Cartographie de la résistivité électrique sur le site Gallo-Romain de Vieil-Evreux (Eure), ARP : voie 2, épaisseur du terrain prise en compte environ 1 m. Les structures résistantes apparaissent en clair (plus forte résistivité) et les structures de terre plus conductrices en sombre.

- 10 Le deuxième exemple est celui de l'abbaye cistercienne du Val Richer (Saint-Ouen-le-Pin, Calvados)⁴. Les pierres de cette abbaye du XII^e siècle ont été vendues lors de la

Révolution et il ne reste que les lits de fondations. La prospection manuelle a été réalisée avec trois profondeurs d'investigation : 0,5 m, 1 m et 1,5 m. La faible profondeur et l'homogénéité de l'argile sous-jacente ont permis d'inverser les données en calculant la résistance transverse de la couche archéologique (épaisse d'environ 0,7 m). Représentée sur la figure 6, elle montre les contours de l'ancienne église et du cloître.

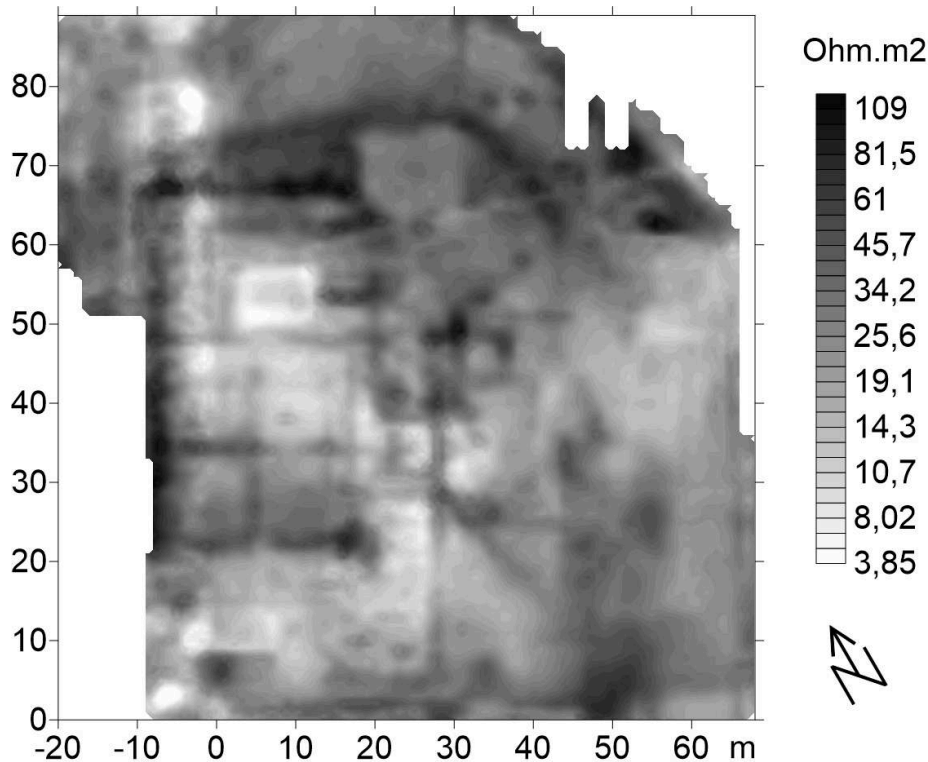


Fig. 6. Abbaye cistercienne du Val Richer (Calvados). Cartographie de la résistance transverse calculée à partir des mesures de résistivité à trois profondeurs d'investigation différentes.

4. Substructions en milieu urbain

- 11 Après plusieurs tests avec la méthode électromagnétique basse fréquence, les premières prospections en ville ont été réalisées sur des édifices religieux avec la méthode électrique. La figure 7 montre la carte de résistivité apparente obtenue en 1974 sur le parking au sud de la nef (Basse-Euvre) de la cathédrale Saint-Pierre de Beauvais : elle délimite très clairement un bâtiment attenant. Une prospection comparable réalisée à La Charité-sur-Loire en 1975 sur le square des bénédictins a été portée à la connaissance du grand public par un article dans 'Le Monde'⁵. Aujourd'hui il est d'usage d'associer les méthodes de prospection radar-sol et électrostatique comme le montrent les cartographies réalisées dans le cadre du programme européen Feder PROGRESS à la fin des années 90, en particulier dans la cathédrale de Gérone⁶ ou celle de Sainte-Marie à Bastia (Fig. 8a et b). Les travaux menés sur la 'Grand-Place' de Bruxelles à l'initiative de François Blary montrent ce qu'il est possible de faire pour l'étude du sous-sol d'une ville et non plus d'un bâtiment particulier (Fig. 9 et 10). Le sous-sol très conducteur se prête ici mal à une investigation radar et seules sont détectées des structures (très peu profondes) postérieures au bombardement de 1695 (réseaux en concession, fontaine...). La prospection électrostatique en revanche montre

les masses construites, ses résultats ont pu donner lieu à un premier essai d'interprétation (Fig. 10).

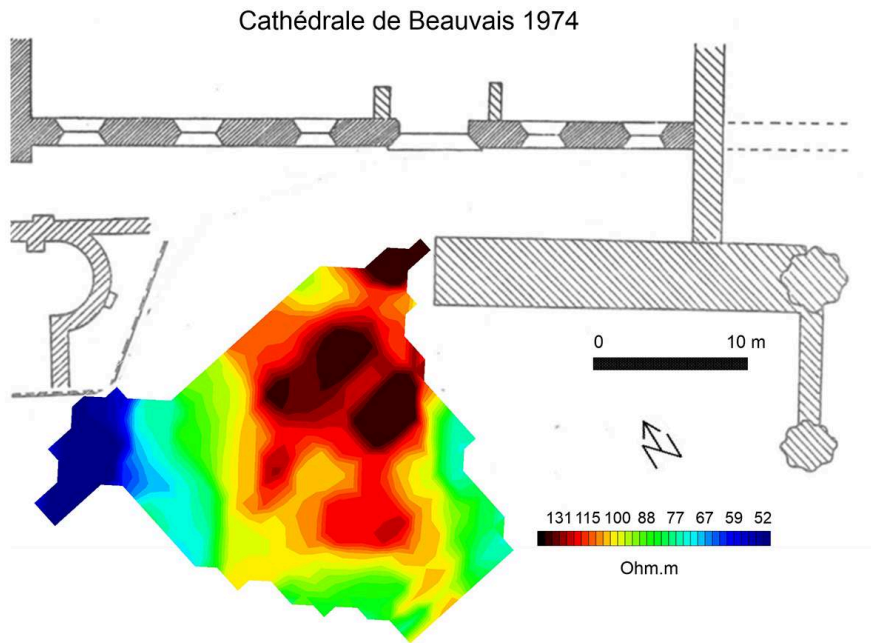
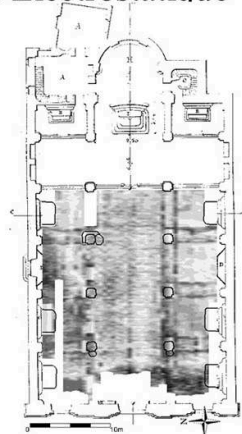


Fig. 7. Cartographie de la résistivité électrique (Quadripôle Wenner $a=1,5$ m) au sud de la cathédrale Saint-Pierre de Beauvais.

Utilisation complémentaire des méthodes Radar-Sol (GPR) et Electrostatique

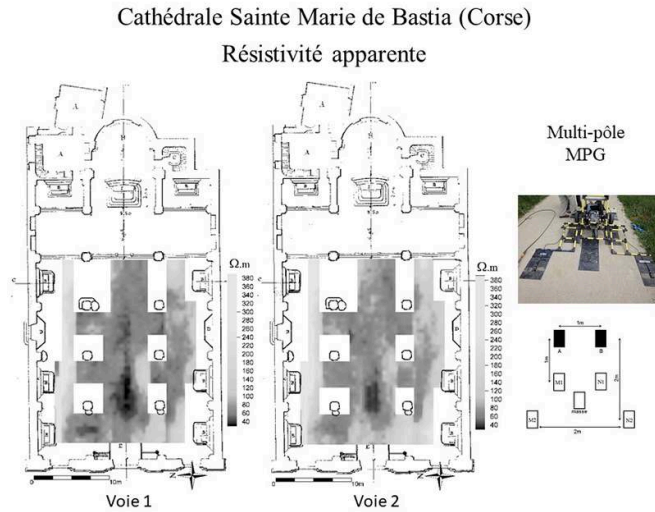


Cathédrale Sainte Marie
Bastia (Corse)

Programme européen PROGRESS
1997 - 1999

Prospection Radar-Sol
Pulse-Ekko 1000
450 MHz

Amplitude réfléchie entre 4 et 8 ns
(soit environ 40 cm)



2

Fig. 8a et b. Cathédrale Sainte-Marie de Bastia (a) Prospection Radar-sol montrant les chainages placés entre les colonnes et les murs, (b) Prospection électrostatique montrant les variations de la résistivité électrique sur le premier mètre ainsi qu'un vide lié à un ossuaire découvert après la prospection dans la nef.

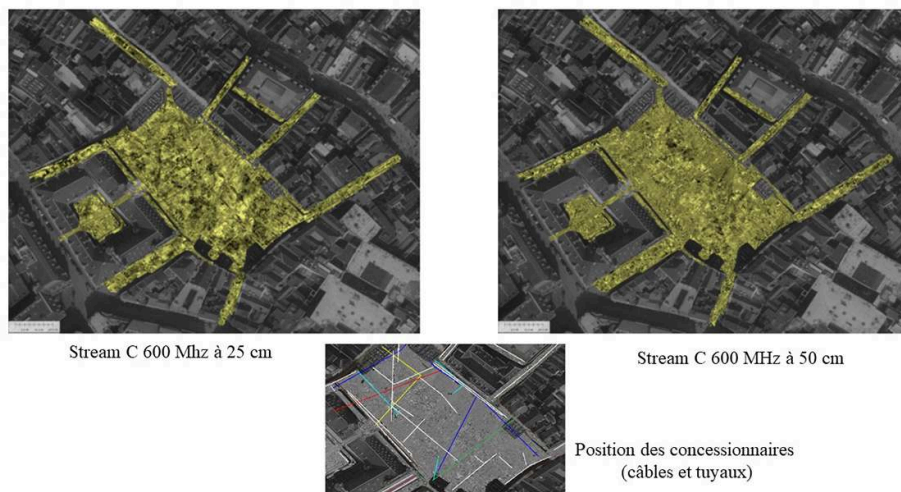


Fig. 9. 'Grand-Place' de Bruxelles mesures avec le Radar-sol, cartes de l'intensité réfléchi à deux profondeurs et interprétations quant à la position des différents réseaux.

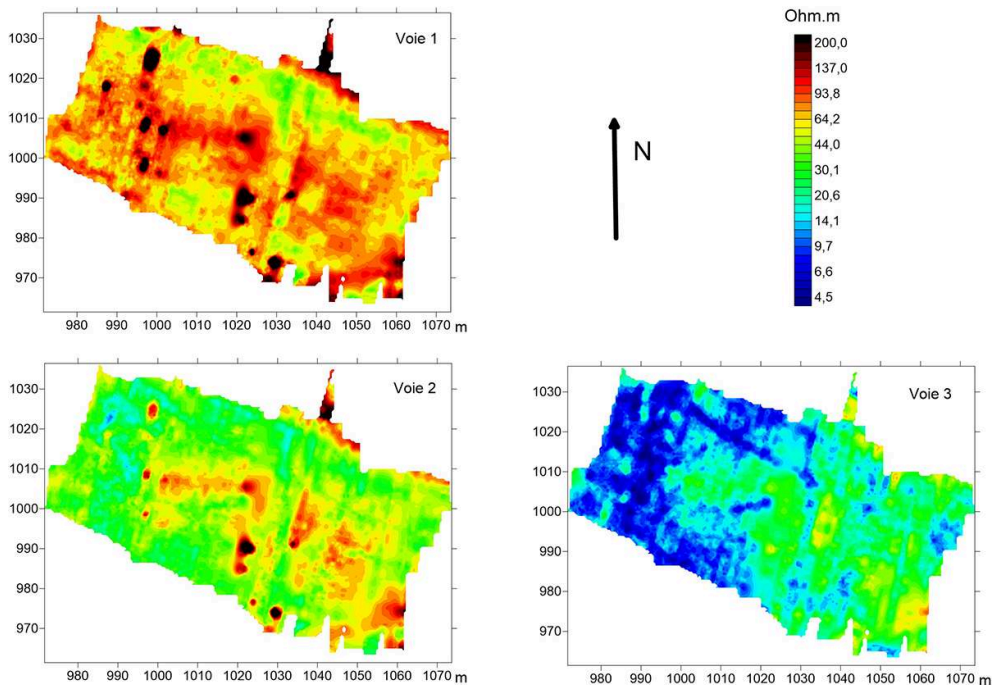
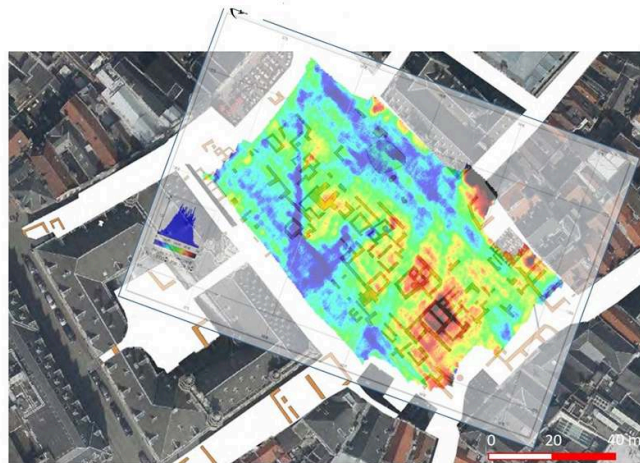
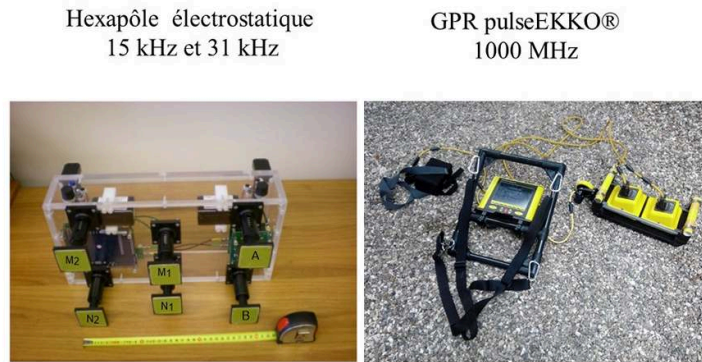


Fig. 10a et b. Cartographie de la résistivité apparente obtenue avec les 3 voies de l'instrument MP3 (Photographie Fig. 2) et première interprétation proposée par François Blary (mars 2019).

5. Analyse des éléments du bâti en place

- 12 Des versions adaptées à l'auscultation des murs et des éléments en élévation existent tant pour les radars où l'on emploie des fréquences plus hautes et des antennes de petite taille que pour la méthode électrostatique pour laquelle a été développé un Hexapôle à deux voies de mesures (Fig. 11). Trois exemples d'utilisation de ces outils sont présentés sur les figures 12, 13 et 14. Dans le premier il s'agit de localiser d'éventuels passages, dans le second un enfeu. Le troisième exemple porte, lui, sur l'identification des caractéristiques des pierres et donc sur les décisions et choix des constructeurs⁷.



1

Fig. 11. Dispositifs d'investigation décamétrique utilisés pour les murs : Hexapôle électrostatique où la voie 1 prend en compte une épaisseur de 8 à 10 cm et la voie 2 une épaisseur de 15 à 20 cm et Radar 'Pulse Ekko' (Sensors and Software) de fréquence centrale 1 GHz.

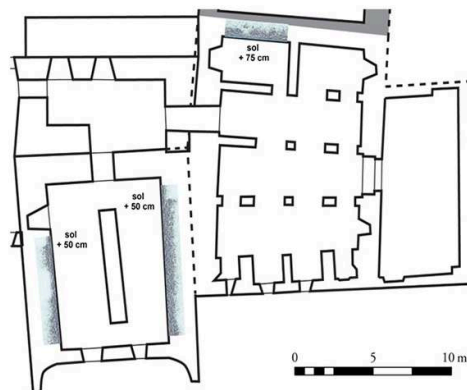
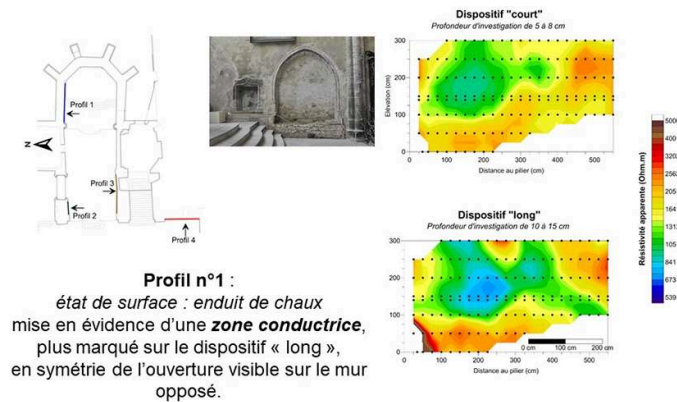


Fig. 12. Recherche avec le Radar du rebouchage d'un ancien accès dans la Tour Saint-Andoche à Autun (Saône-et-Loire).



1

Fig. 13. Baume-les-Messieurs, cartographie de la résistivité de la surface d'un mur du chœur avec l'Hexapôle pour rechercher un possible enfeu.

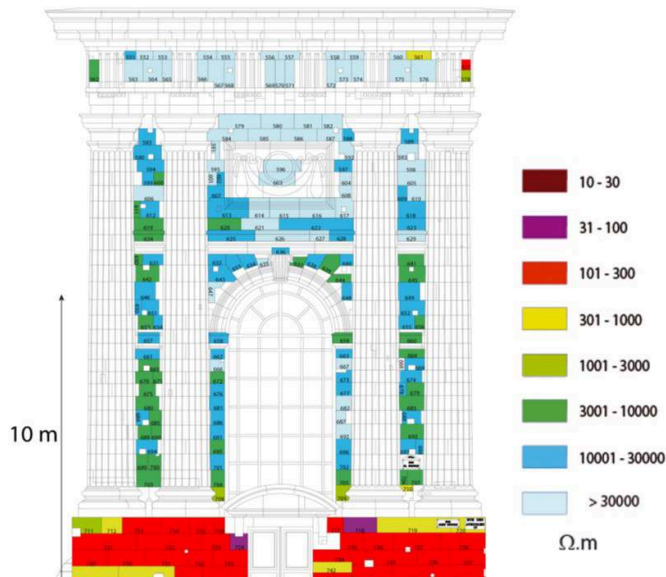


Fig. 14. Identification de la résistivité électrique des pierres utilisées dans la construction de la tour Nord de la façade de l'église Saint-Sulpice à Paris (construite à partir de 1645). Les constructeurs ont volontairement choisi des calcaires contenant quelques pourcent d'argile et donc électriquement plus conducteurs, plus solides que les calcaires électriquement résistants plus pauvres en argile utilisés pour les parties supérieures.

6. Conclusion

- 13 Le survol réalisé ici n'a pas la prétention d'apporter une information complète sur les capacités ou les limites de l'outil géophysique. Il vise simplement à illustrer la nature de l'information que cet outil peut apporter et à souligner la rapidité (facilité) des mesures comme leur caractère non destructif, si important en archéologie.

NOTES

1. PANISSOD C., DABAS M., FLORSCH N., HESSE A., JOLIVET A., TABBAGH A., TABBAGH J., « Archaeological prospecting using electric and electrostatic mobile arrays », *Archaeological Prospection*, 5, 1998, p. 239-251.
 2. TABBAGH A., PANISSOD C., BENECH C., DABAS M., JOLIVET A., GUERIN R., « Un outil de reconnaissance géophysique en milieu urbain : la prospection électrostatique », *Revue française de Géotechnique*, 101, 2002, p. 3-10.
 3. DABAS M., GUYART L., LEPERT T., « Gisacum revisitée. Croisement géophysique et archéologie », *Les Dossiers d'Archéologie*, 295, 2005, p. 52-61.
 4. VINCENT J.-B., DUBOIS A., HULIN G., MANEUVRIER C., TABBAGH A., « L'abbaye cistercienne du Val-Richer (Calvados) : prospections micro-topographique et géophysique d'un monastère disparu », *Archéologie Médiévale*, 48-8, 2018, p. 129-152.
 5. REBEYROL Y., « L'église enfouie de la Charité sur Loire », *Le Monde*, n° 9468, 29-30 juin 1975, p. 1 et 7.
 6. DABAS M., CAMERLYNCK C., FREIXAS P., « Simultaneous use of electrostatic quadrupole and GPR in urban context : investigation of the basement of the Cathedral of Girona (Catalunya-Spain) », *Geophysics*, 65-2, 2000, p. 526-532.
 7. SOUFFACHE B., KESSOURI P., BLANC P., THIESSON J., TABBAGH A., « First investigations of *in situ* electrical properties of limestone blocks of ancient monuments », *Archaeometry*, 58-5, 2016, p. 705-721.
-

RÉSUMÉS

L'outil géophysique est utilisé en archéologie pour décrire dans les trois dimensions la répartition spatiale d'une propriété physique de l'échelle métrique ou décamétrique, lorsque l'investigation porte sur le sous-sol, à l'échelle décimétrique lorsqu'elle porte sur du bâti en élévation. Les mesures sont réalisées sous plusieurs conditions : ne modifier en rien le milieu étudié, être reproductibles et rapides, montrer une variabilité suffisamment importante pour que l'on puisse différencier les matériaux archéologiques s'ils présentent un volume et un contraste suffisants. Trois propriétés physiques sont principalement utilisées : la résistivité électrique (par l'emploi des méthodes électrique, électrostatique ou électromagnétique basse fréquence, EMI), la susceptibilité magnétique (méthodes magnétiques et EMI) et la permittivité diélectrique (Radar-sol ou GPR en haute fréquence). En milieu urbanisé, l'existence de nombreuses sources de perturbation et l'état des surfaces étudiées conduisent à privilégier le Radar-sol et la méthode électrostatique.

Les constructions offrent en général des contrastes suffisants pour que l'outil géophysique puisse être utilisé aussi bien pour le relevé du plan de l'ensemble d'une ville que pour l'analyse d'un bâtiment particulier ou d'éléments en élévation. Pour les monuments médiévaux en ville, les premières prospections ont été réalisées dans les années 70 notamment à Beauvais et à La

Charité-sur-Loire par la méthode électrique. En milieu rural, de nombreux cas ont été traités comme les abbayes de tradition bénédictine. L'exemple de la 'Grand-Place' de Bruxelles montre tout l'intérêt qu'il y a à coupler les méthodes Radar-sol et électrostatique. À l'échelle décimétrique il est possible de mettre en évidence la structure interne d'un mur. L'identification de la nature des pierres utilisées et donc des choix des constructeurs a aussi pu être réalisée sur des édifices médiévaux et modernes encore en élévation.

In archaeology the geophysical tool is used to describe in 3D the spatial distribution of one or several physical properties, from meter to decameter scales when the ground is investigated, and to decimeter scale for standing up elements. Several requirements have to be respected : no modification of the studied medium, repeatable and quick measurements, variability allowing material identification if the volume and/or the contrast are sufficient. Three properties are mainly considered : the electrical resistivity (DC method, electrostatic method and low frequency electromagnetic, EMI), the magnetic susceptibility (magnetic and EMI methods) and dielectric permittivity (Ground Penetrating Radar, GPR). In urban contexts the numerous disturbances and the risk to damage surface material lead to favor GPR and electrostatic method (Capacitive Coupled Resistivity, CCR).

Buildings and their remains generally exhibit good contrasts and geophysical methods can be used to both recording city or settlements plans and investigating standing up walls. Middle Age towns like Beauvais and La Charité-sur-Loire, have been surveyed since the 70's by using the electrical method. In the country side abbeys, castles and farms have been studied. The 'Grand-Place' in Brussels is a relevant example of the coupling of both GPR and electrostatic methods. At the decimeter scale, it is possible to analyze the structure of a wall and to identify the stone origin which opens the way to the knowledge of the choices achieved by builders.

INDEX

Mots-clés : prospection géophysique, résistivité électrique, permittivité diélectrique, radar-sol, vestiges enfouis, structure du bâti

Keywords : Archaeological Surveying, Electrical resistivity, Permittivity, Ground Penetrating Radar, Buried Remains, Building Structure

AUTEURS

ALAIN TABBAGH

Professeur émérite, Sorbonne Université, UMR 7619 METIS.
alain.tabbagh@upmc.fr

CHRISTIAN CAMERLYNCK

Maître de conférence, UMR 7619 Métis, Sorbonne Université-CNRS-EPHE.
christian.camerlynck@sorbonne-universite.fr

MICHEL DABAS

Directeur de Recherche CNRS, UMR 8546, Laboratoire AOROC, ENS, PSL.
michel.dabas@ens.psl.eu