



HAL
open science

Enjeux, résultats et limites de la prospection géophysique sur les monuments religieux

Michel Dabas

► **To cite this version:**

Michel Dabas. Enjeux, résultats et limites de la prospection géophysique sur les monuments religieux. Archéologie du bâti aujourd'hui et demain, CEM, Oct 2019, Auxerre, France. 10.4000/cem.20182 . hal-04321591

HAL Id: hal-04321591

<https://hal.science/hal-04321591>

Submitted on 4 Dec 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



Enjeux, résultats et limites de la prospection géophysique sur les monuments religieux

Introduction

Michel Dabas



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/cem/20182>

DOI : [10.4000/cem.20182](https://doi.org/10.4000/cem.20182)

ISSN : 1954-3093

Éditeur

Centre d'études médiévales Saint-Germain d'Auxerre

Référence électronique

Michel Dabas, « Enjeux, résultats et limites de la prospection géophysique sur les monuments religieux », *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre | BUCEMA* [En ligne], 27.1 | 2023, mis en ligne le 18 juillet 2023, consulté le 02 août 2023. URL : <http://journals.openedition.org/cem/20182> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/cem.20182>

Ce document a été généré automatiquement le 2 août 2023.



Creative Commons - Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Partage dans les Mêmes Conditions
4.0 International - CC BY-NC-SA 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Enjeux, résultats et limites de la prospection géophysique sur les monuments religieux

Introduction

Michel Dabas

NOTE DE L'ÉDITEUR

Historique

Reçu : 23 octobre 2022 - Accepté : 30 avril 2023

- 1 Les exposés de ces deux jours d'études monastiques ont bien montré combien les méthodes géophysiques sont maintenant utilisées pour l'étude des complexes religieux en France. Il en est de même en d'autres pays. Les informations inédites que nous apportent les « anomalies » géophysiques et leur interprétation permettent un renouvellement de l'étude de ces édifices tout en amenant, progrès oblige, de nouveaux questionnements : cette reconnaissance des sols, mais aussi des volumes verticaux, permet de découvrir ou redécouvrir les sites religieux sous un autre angle que celui de la fouille ou de l'étude des plans anciens.
- 2 Mais, force est de constater la jeunesse de l'expérience du géophysicien pour ce type d'édifice ainsi que dans sa relation avec les archéologues. Si l'utilisation de la géophysique en *openfield* sur des surfaces importantes ne pose plus de problème particulier pour détecter des structures simples, comme des maçonneries ou des fosses/fossés, la situation est très différente pour ces édifices qui cumulent essentiellement deux handicaps : d'une part, ils se situent généralement dans un environnement où peu de méthodes géophysiques sont facilement applicables – corrélativement peu de surfaces sont directement accessibles –, d'autre part, la complexité de l'histoire de ces édifices se traduit par une variabilité spatiale de l'enregistrement sédimentaire à laquelle le géophysicien n'est pas habitué.

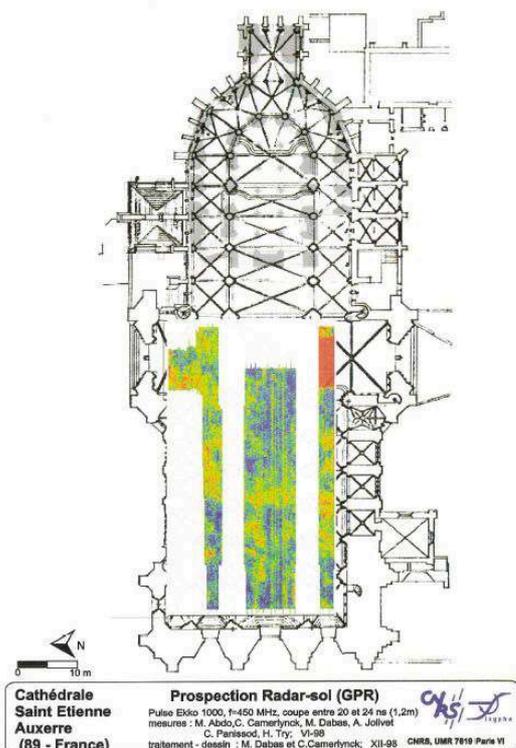
- 3 Autant les méthodes électrique ou magnétique sont utilisées majoritairement en géophysique appliquée à l'archéologie, autant le radar reste la méthode la plus employée pour sonder les édifices religieux. La majorité des études de cas présentées dans ce numéro en témoigne. Bien évidemment, sur les sites sur lesquels l'accès à la terre végétale est possible, les méthodes électriques et parfois magnétiques restent utilisables.

1. Historique

- 4 Nous avons commencé à utiliser le radar dans le cadre de l'étude des édifices religieux pour l'abbaye Saint-Germain d'Auxerre au début des années 1990. Les premiers tests d'acquisition et de restitution sous forme de simples coupes verticales – « B-scan » dans la terminologie NDT *Non Destructive Testing* – issues de profils trop espacés n'avaient guère apporté de résultats convaincants pour l'archéologie. Ces tests ayant été effectués dans le cadre d'une prestation avec une société, il était impossible de multiplier le nombre de profils et de tests. De plus, la représentation des profils sur papier rendait l'exploitation des résultats très difficile.
- 5 L'achat d'un radar par notre laboratoire à l'université Paris VI (laboratoire Sisyphe) en 1994 a changé la donne, nous permettant de déclencher tous les tests nécessaires et donc de progresser dans la compréhension des possibilités et limites de cet appareil : on peut remarquer, en effet, que les modalités d'utilisation des instruments géophysiques ne correspondent que rarement à leur utilisation en archéologie. Il est donc nécessaire de développer un nombre important de tests, d'abord sur des structures connues, puis sur des terrains d'étude, afin de se familiariser avec l'appareillage et définir le ou les protocoles d'utilisation optimaux en archéologie.
- 6 L'acquisition d'un nombre de données de plus en plus important – nous sommes d'ailleurs convaincus que ceci reste l'une des clefs du succès de l'utilisation du radar en archéologie – implique aussi de nouvelles possibilités de traitements. Nous avons développé avec Christian Camerlynck (laboratoire Sisyphe) les premiers programmes en Fortran puis dans l'environnement IDL, permettant d'associer un ensemble de profils radar pour recréer des coupes dites « horizontales » (« C-Scan »), toujours plus parlantes pour l'interprétation – première publication sur une voie romaine et un *fanum* dans la Nièvre en 1994¹. Ces coupes horizontales, souvent interprétées abusivement comme une image des structures à une profondeur donnée, font ressortir la cohérence des réflecteurs d'un profil à l'autre. Si l'on admet que l'effet des éventuelles variations de la topographie de surface a été corrigé, ces « coupes » représentent uniquement l'énergie réfléchiée par le sous-sol à un temps donné. Le passage d'une coupe-temps à une coupe-profondeur n'est pas trivial puisqu'il suppose que la vitesse de propagation de l'onde radar soit connue en tout point (calibration). On se rend donc compte que deux erreurs peuvent se cumuler dans une coupe-profondeur : une vitesse moyenne mal calibrée et/ou des variations de vitesse au sein d'un même profil. La conséquence sur la coupe-profondeur est double : la profondeur calculée n'est pas correcte et/ou les objets visualisés à une profondeur donnée appartiennent en fait à plusieurs profondeurs différentes. Ceci a donc évidemment des conséquences importantes pour la fouille ultérieure. Ainsi, il est important de mentionner dans les rapports si des coupes-profondeur sont affichées, la vitesse de calibration utilisée, la méthode de calcul et l'endroit du terrain où elle a été estimée.

- 7 Nous avons appliqué ces programmes informatiques pour créer par exemple les coupes-profondeur dans la cathédrale Saint-Étienne d'Auxerre en 1998 (fig. 1), qui ont permis de détecter le porche roman du XI^e siècle, retrouvé par la suite dans un sondage réalisé par Harry Titus². Dans le cadre d'un programme européen³, la méthode radar, couplée à la méthode électrostatique, a été appliquée avec succès à plusieurs édifices, notamment les cathédrales de Gérone et de Bastia.

Fig. 1 – Prospections de la cathédrale Saint-Étienne d'Auxerre (Yonne) en 1998.



a. Carte de la résistivité électrique avec un prototype de résistivimètre électrostatique, profondeur d'investigation d'un mètre (résistant en rouge, conducteur en bleu).

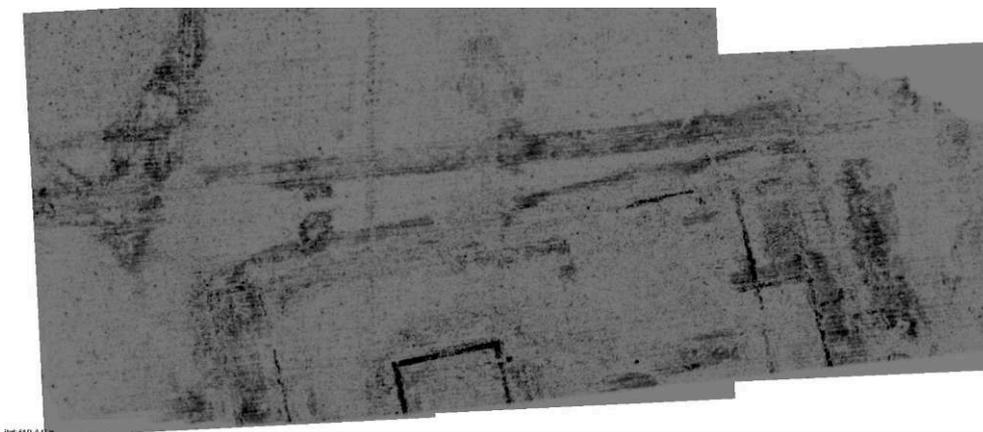
b. Carte de l'intensité des réflexions radar pour une fréquence de 450 MHz et une profondeur de 1,2 m (réflexion faible en bleu, forte en rouge).

- 8 À la fin des années 1990, l'utilisation du radar en archéologie est suffisamment développée, du moins au Japon et aux États-Unis, pour que soit publié le premier livre sur la question par deux géophysiciens : Larry Conyers et Dean Goodman⁴. Le premier écrira une suite logicielle « GPR Process », reprenant des codes *Open Source* développés par le service géologique américain (USGS, Jeff Lucius)⁵, et le second écrira le logiciel commercial qui reste à ce jour la référence en archéologie : *GPR-Slice*.
- 9 Depuis les années 2010, l'apparition des systèmes radar multi-antennes (fig. 2), multi-fréquences, voire multi-polarisations, dans le domaine de la recherche des servitudes (canalisations) et, surtout, l'apparition de traitements de plus en plus pointus ont permis un plus grand développement pour l'archéologie (fig. 3)⁶. On peut donc considérer que c'est à partir de cette décennie que le potentiel du radar-sol a été confirmé.

Fig. 2 – Système radar multi-antennes (Stream-X IDS) tracté et positionnement par GPS RTK en opération dans l'abbaye de Preuilly (Seine-et-Marne).



Fig. 3 – Carte à très haute résolution spatiale (8 cm) de l'intensité des réflexions radar (Mira Mala) pour une fréquence de 400 MHz et une profondeur de 60 cm sur le *fanum* ouest du site du Vieil-Évreux (Eure), mettant en évidence les murs de la *cella* et du péribole, une voie, ainsi que des tranchées (réflexions fortes en noir).



- 10 Cette révolution avait été annoncée par un spécialiste de la méthode magnétique, Helmuth Becker, avec sa règle désormais célèbre des trois S : « Speed - Sensitivity - Spatial resolution⁷ » : le gain de productivité introduit d'abord par les systèmes multi-antennes puis par leur motorisation, permet maintenant une cartographie à l'échelle d'un paysage – surfaces de plusieurs centaines d'hectares. On peut citer les résultats obtenus lors de très grands projets, comme celui de Stonehenge en Angleterre (297 ha de radar), de la ville Viking de Birka en Suède (45 ha de radar) ou de la capitale de la province de Pannonie, Carnuntum (217 ha de radar) par l'équipe du LBI ArchPro à Vienne, qui avait fait du radar sa méthode de prédilection. La surface totale prospectée par cette équipe avoisine 12 700 ha depuis 2010⁸. Le savoir-faire du LBI ArchPro a été transféré récemment au ZAMG (université de Vienne) et au *Norwegian Institute for Cultural Heritage* (NIKU) : depuis 2015 plus de 449 ha de sites archéologiques et de chantiers d'archéologie préventive en Norvège ont été cartographiés. En Angleterre, on peut citer les travaux novateurs d'English Heritage, puis Historical England, en

particulier dans l'étude des parcs et jardins grâce à des antennes surélevées et des radars à synthèse de fréquence⁹.

- 11 Nous nous sommes livrés à une statistique en se basant sur le nombre de papiers proposés lors des conférences internationales sur la prospection archéologique (ICAP) organisées tous les deux ans. En prenant la conférence de 2007 à Nitra (Slovaquie), sur 83 contributions, le radar apparaissait dans 19 d'entre elles (23 %) et une seule contribution concernait des structures médiévales. Dix ans après, en 2017, lors de la dernière conférence internationale de Bradford, sur 108 papiers, 44 incluaient des études utilisant le radar (41 %) et 6 portaient sur la période médiévale. En dix ans, le cas d'étude radar a donc presque doublé et montre l'utilisation de plus en plus courante de cette méthode. Même si le pourcentage d'études de cas sur des périodes médiévales est encore faible (14 %), ce chiffre est en progression significative.
- 12 En résumé, si les premiers tests radar datent de presque cinquante ans, on a vu que son émergence en archéologie est plus récente, une trentaine d'années tout au plus, et son application « en routine » encore plus récente : une dizaine d'années.
- 13 Souvent, des images très parlantes de structures archéologiques sont publiées ou montrées dans les conférences, images dont les résolutions spatiales atteignent maintenant quelques centimètres pour les derniers systèmes multi-antennes. La motorisation a eu tendance à privilégier l'étude des grandes surfaces. Dans cette évolution, normale pour une jeune discipline, les géophysiciens ont donc eu tendance à se concentrer sur des structures simples, parfois déjà reconnues par d'autres méthodes géophysiques ou d'autres moyens d'investigations (images aériennes, plans anciens...).
- 14 À l'opposé, l'originalité et la difficulté de l'étude des sites religieux, objet de cette table ronde, sont, nous l'avons déjà signalé, l'exiguïté des surfaces et la complexité stratigraphique. Les images obtenues sont rarement parlantes d'elle-même et le travail d'interprétation prépondérant. C'est pourquoi, ici encore plus qu'ailleurs, l'étude des cas où des sondages et fouilles ont été effectués – le « *ground truthing* » de la littérature anglo-saxonne – est capitale aussi bien pour l'archéologue que pour le géophysicien. Tout ceci explique le faible nombre d'études de cas en archéologie médiévale.

2. Quels sont les facteurs de progression ?

- 15 Nous avons pu identifier trois facteurs – instrumental, logiciel et le retour d'expérience – qui permettraient un meilleur développement des méthodes radar pour l'archéologie des complexes religieux, même si, souvent, ces facteurs ne sont pas spécifiques à l'étude des monuments religieux.
- 16 Parmi les facteurs instrumentaux, le positionnement des antennes radar dans des édifices encore en élévation reste problématique. Les premières prospections étaient effectuées avec des décimètres posés au sol et déplacés en tenant compte des nombreux obstacles présents. Autant les nefs et les bas-côtés, quand ils étaient dégagés de leur mobilier, ne posaient pas trop de problèmes, autant les surfaces entre les piliers, par exemple, nécessitaient de nombreux raccords plus complexes à traiter par la suite. L'apparition des stations robotisées a clairement simplifié le travail du prospecteur, même si plusieurs stations sont néanmoins nécessaires pour contourner les obstacles et que le prix de cette instrumentation reste élevé. L'électronique des radars et les systèmes d'acquisition ont énormément évolué. Les premiers systèmes

d'acquisition en continu, par exemple, impliquaient des vitesses de déplacement très faible – même une progression à la vitesse d'un marcheur était trop importante – et/ou des *stacking* – sommation des signaux pour diminuer le bruit – très peu élevés. Les progrès dans la vitesse d'échantillonnage permettent maintenant des vitesses d'acquisition très élevées – avec des applications embarquées sur des voitures ou même des chemins de fer pour l'auscultation des routes et ballasts. Dans la dernière génération de radar, le signal (A-Scan) peut être échantillonné en une seule fois permettant à la fois une diminution du bruit et une augmentation de la vitesse maximale d'acquisition. De la même façon, les derniers radars sont plus facilement transportables, associés à des consoles dont la robustesse et l'autonomie sont plus importantes que celle des ordinateurs utilisés auparavant. La commande des radars est devenue aussi beaucoup plus simple à gérer, cachant un certain nombre de paramètres techniques que le géophysicien peut néanmoins contrôler.

- 17 Le second facteur de progression concerne le logiciel. Comme nous l'avons ci-avant mentionné, quelques logiciels existent. Pour les logiciels libres, force est de constater qu'ils incluent, avec un temps de retard important, les derniers types de radar ainsi que leurs nouveaux formats, dont certains sont, de plus, malheureusement propriétaires. Pour les logiciels propriétaires, dont les coûts sont non négligeables, leur complexité croissante – parce qu'ils doivent, entre autres, s'adapter à un nombre de constructeurs de plus en plus important ainsi qu'aux différents moyens de positionnement – rend leur utilisation de plus en plus complexe pour celui qui ne les utilise pas régulièrement. La marge de progression des logiciels est donc très large, tant du point de vue l'ergonomie que de l'intégration de traitements déjà utilisés en routine en prospection sismique par exemple, ou bien encore d'une éventuelle intégration dans un véritable système d'information géographique. La visualisation, support nécessaire de l'interprétation avec l'archéologue est encore limitée aux coupe-profondeur et les vues 3D ressemblent encore plus à des gadgets qu'à de véritables outils de travail.
- 18 Le troisième facteur de progression est celui du retour d'expérience, et c'est bien l'objet de ce volume (fig. 4).

Fig. 4 – Phase d'interprétation en commun entre archéologues et géophysiciens (abbaye de Saint-Riquier dans la Somme).



- 19 Sans validation des interprétations avec la « réalité » du terrain, il est très difficile d'avancer dans la compréhension des anomalies radar. C'est la spirale herméneutique dont parle M. Doneus qui permet cet aller-retour avec l'archéologue et la réciprocité entre le tout et le détail. On soulignera également que notre progression tient aussi dans l'étude des cas d'échecs de détection et des mauvaises interprétations, fort peu mentionnées dans la littérature ou les colloques.

3. Les défis

- 20 Un certain nombre de défis ont pu être identifiés pendant ces deux jours d'étude afin de mieux prendre en charge les prospections géophysiques des édifices religieux :
- combiner plusieurs méthodes géophysiques. L'utilisation de plusieurs méthodes géophysiques sur le même site permet d'augmenter la confiance du géophysicien dans ses interprétations. De plus, si les paramètres physiques mesurés sont différents, les cartes du sous-sol seront différentes et apporteront donc plus d'information. En particulier, la méthode électrostatique pourrait être utilisée systématiquement avant toute intervention radar, puisque c'est l'une des seules méthodes applicables sur des surfaces électriquement isolantes en condition urbaine. Même si le LiDAR n'est pas classé dans les méthodes géophysiques mais dans les méthodes de télédétection, l'intégration des données hors-sol et du sous-sol, très rare à l'heure actuelle, est à développer ;
 - harmoniser les cartes. Le morcellement géographique des zones étudiées, conséquence de la multiplication des missions dans le temps, fait que les traitements, loin d'être standardisés, créent une complexité supplémentaire, préjudiciable à une interprétation globale ;
 - optimiser l'usage des surfaces. Les surfaces disponibles pour les techniques géophysiques sont très souvent de formes complexes et morcelées. L'état de surface peut d'ailleurs rendre

le couplage des antennes radar problématique. Les appareils dont les tailles sont parfois importantes (électrostatique) ne permettent pas de s'adapter à ces surfaces exigües ;

- intégrer les fouilles. Il est important de pouvoir superposer les relevés des sondages et des fouilles aux images géophysiques afin de favoriser les retours d'expérience. Cette opération est loin d'être la norme actuellement et devrait être systématique ;
- intégrer tous les cas de détection, même négatifs. Il est important de convaincre les archéologues de faire appel aux méthodes géophysiques et d'analyser a posteriori tous les résultats de sondages, même si ceux-ci sont négatifs ou différents de la première interprétation faite ;
- faire comprendre aux archéologues que les méthodes géophysiques servent aussi bien à définir l'environnement des sites qu'à orienter le positionnement des sondages et fouilles ;
- comprendre les sites polyphasés. Le radar est l'une des seules méthodes qui apporte une vision tridimensionnelle et permet donc de préciser des éléments stratigraphiques. Il reste à développer cette possibilité pour les sites qui sont caractérisés par une histoire complexe.

4. Conclusion

- 21 Cette sixième journée d'études monastiques a montré de nombreux exemples d'utilisation des méthodes géophysiques dans le cadre d'étude des complexes religieux en France, mais aussi à l'étranger. Les informations apportées, essentiellement par la prospection radar, permettent un renouvellement de l'étude de ces édifices tout en amenant de nouveaux questionnements : cette reconnaissance des sols, mais aussi des volumes verticaux, permet de découvrir ou redécouvrir les sites religieux sous un autre angle que celui de la fouille ou de l'étude des plans anciens. Plusieurs facteurs de progression ont été identifiés ainsi qu'un certain nombre de défis qu'il nous reste à relever. En trente ans, le questionnement de l'archéologue s'est déplacé d'une simple interrogation « est-ce que je "fais" de la géophysique ? » à « quelles questions je peux poser à la géophysique ? ». Les différentes contributions montrent que le champ des possibilités s'élargit chaque jour, mais que le croisement avec les résultats des sondages et fouilles reste obligatoire pour comprendre l'origine des anomalies que l'on tente d'interpréter.

NOTES

1. C. CAMERLYNCK, M. DABAS et C. PANISSOD, « Comparison between GPR and four electromagnetic methods for stone characterization : an example », *Archaeological Prospection*, 1 (1994), p. 5-17.
2. H. TITUS, M. DABAS et C. CAMERLYNCK, « Non-destructive Sensing Projects beneath the Auxerre cathedral », *Gesta*, 40-2 (2001), p. 181-188.
3. Projet Feder PROGRESS (1997-1999) : *PROspection Geophysical, Research and Selective Subsoil excavation*.
4. L. CONYERS et D. GOODMAN, *Ground-Penetrating Radar : an introduction for Archaeologists*, Londres, 1997.

5. J. E. LUCIUS et J. H. POWERS, « GPR Data Processing Computer Software for the PC », USGS Open-File Report 02-166, 2002.
 6. A. NOVO, M. DABAS et G. MORELLI, « Fast High-Resolution Archaeological Mapping : STREAM X tested at Vieil-Évreux (France) », *Archaeological Prospection*, 19 (2012), p. 179-189.
 7. H. BECKER, « Caesium-magnetometry for landscape archaeology », in S. CAMPANA et S. PIRO (éd.), *Seeing the unseen. Geophysics and landscape archaeology*, Londres, p. 129-165.
 8. I. TRINKS *et al.*, « Large-area high-resolution ground-penetrating radar measurements for archaeological prospection », *Archaeological Prospection*, 25 (2018), p. 171-195.
 9. N. LINDFORD, P. LINDFORD et A. PAYNE, « Over head and ears in shells'recent examples of geophysical survey of historic designed landscapes and gardens », in B. JENNINGS, C. GAFFNEY, T. SPARROW et S. GAFFNEY (dir.), *12th International Conference of Archaeological Prospection*, Oxford, 2018, p. 140-141.
-

AUTEUR

MICHEL DABAS

UMR AOrOC, ENS-CNRS