



HAL
open science

Detection of final-Neolithic cultural layers using GPR (Ground Penetrating Radar) under the actual level of Lake Chalain (France)

Michel Dabas, Christian Camerlynck, Gilles Bossuet, Pierre Petrequin,
Maxence Bailly

► To cite this version:

Michel Dabas, Christian Camerlynck, Gilles Bossuet, Pierre Petrequin, Maxence Bailly. Detection of final-Neolithic cultural layers using GPR (Ground Penetrating Radar) under the actual level of Lake Chalain (France). *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série IIa, Sciences de la terre et des planètes*, 1999, 199 (328), pp.509-514. hal-02925667

HAL Id: hal-02925667

<https://hal.science/hal-02925667>

Submitted on 30 Aug 2020

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.

Détection par méthode radar de niveaux anthropiques du Néolithique *final* sous le niveau actuel du lac de Chalain (France)

Detection of final-Neolithic cultural layers using GPR (Ground Penetrating Radar) under the actual level of Lake Chalain (France)

Michel Dabas^{a*}, Christian Camerlynck^a, Gilles Bossuet^b, Pierre Pétrequin^b, Maxence Bailly^b

^a Département de géophysique appliquée, UMR 7619 du CNRS, université Pierre-et-Marie-Curie, Tour 15–25, E1, boîte 105, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France

^b Laboratoire de chrono-écologie, UMR 6565 du CNRS, UFR sciences et techniques, université de Franche-Comté, 16, route de Gray, 25030 Besançon cedex, France

(Reçu le 30 novembre 1998, accepté après révision le 1^{er} février 1999)

Abstract — Several GPR profiles are carried out on Lake Chalain (Jura) in order to detect several anthropic layers dating from Middle Neolithic times. The geometry of the sedimentary deposits is imaged by several GPR reflectors. Several auger borings allow the GPR reflectors to be correlated with anthropic levels (strata interleaved within lacustrine chalk). In particular, the oldest and finest (5 cm) level (of Horgen culture from the 32nd century BC) is detected. This experiment proves that it is possible to characterize the 3-dimensional geometry of the deposits from Lake Chalain built up in Middle Neolithic times. (© Académie des sciences / Elsevier, Paris.)

GPR / Neolithic / Horgen / lacustrine / chalk / organic matter / Lake Chalain / France

Résumé — Plusieurs profils radar à 100 MHz sont acquis sur le lac de Chalain (Jura), afin de reconnaître de manière non destructive des niveaux anthropiques repérés ponctuellement par sondages. Leur géométrie est précisée grâce aux nombreux réflecteurs radar. Les sondages carottés permettent de corréler ces réflecteurs avec des niveaux d'occupation conservés sous forme de strates de matière organique, intercalées dans les craies lacustres. Le niveau néolithique le plus ancien, contemporain de la culture Horgen (xxxii^e siècle av. J.-C.), matérialisé dans la stratigraphie par une couche très ténue (5 cm), est détecté. Cet essai ouvre la voie à une cartographie non destructive en 3 dimensions de la géométrie des différents corps sédimentaires accumulés depuis le Néolithique moyen sur les rives du lac de Chalain. (© Académie des sciences / Elsevier, Paris.)

radar / Néolithique / Horgen / craie / lacustre / matière organique / lac de Chalain / France

Abridged version

Introduction

More than 29 archaeological sites are found in the area of Lake Chalain (Jura) in France (*figure 1*). The stratigraphy of

these sites spans from the 32nd to the 24th century BC (Pétrequin et al., 1997). It has been shown that two settlements ('poles') grew up during Neolithic times on the west and the east shores of the lake. The first one is located at 'Prise d'eau'

Note présentée par Jean-Louis Le Mouél.

* Correspondance et tirés à part.
dabas@ccr.jussieu.fr

and has shown a stratigraphy between the Horgen culture (2 600 BC) and the Chalain culture (2 600 BC). To the east, the second pole ('Ilot sous Doucier'), was investigated mainly by augering (Pétrequin and Pétrequin, 1996). The geophysical survey took place on this side (site CH19 and CH20).

The stratigraphy of the sites is composed principally of dark organic matter deposits within a white lacustrine chalk.

In order to study these deposits, the archaeologists can either dig, necessarily limited to a small area, or use auger-borings but with a dense sampling strategy. In the latter case, they will have to face the problem of interpolation between the borings.

The aim of this study is to test the feasibility of Ground Penetrating Radar (GPR) soundings and profiling for delimiting the extent and depth of the Neolithic levels. Despite the fact that GPR has already been used at other archaeological sites, the case of Chalain is specific in two ways. On the one hand, the vertical extent of some of the deposits is very thin (a few centimetres at a depth of two metres or more) and makes this kind of target a challenge for a geophysicist. On the other hand, due to water level changes during historical times, some of the deposits are partly under the present level of the lake or in the transition zone.

Method

GPR is based on the propagation of high frequency electromagnetic radio (radar) pulses into the earth. The system measures the time lapse between emission and reflection on the different discontinuities buried in the ground. The reflection is a function of the electromagnetic contrast (electrical conductivity, dielectric constant, magnetic permeability) between the different materials. Generally, this contrast is mainly one of the dielectric permittivities. An important parameter is the choice of the central frequency of the radar wave. A practical rule is such that the product of the desired depth of investigation (in m) by the frequency chosen (in MHz) equals approximately 500 (Annun, 1992).

The radar used (PulseEkko 100) is designed by Sensors and Software. The chosen central frequency is 100 MHz. Under the field conditions of this site, this corresponds to an investigation depth of maximum 5 m and a spatial resolution of 10 cm. The signal is sampled every 800 ps over a time window of 180 ns.

Data and results

During a first mission, three profiles (*figure 2*) were carried out along the shore and six perpendicularly to the shore. During the second mission, a long profile (number 5) over water was performed. Radar antenna are put over the water level. The distance between each measurements is 20 cm and is monitored by an odometer.

Several Common Mid Point soundings were performed and an average propagation velocity was found between 4 and 5 cm·ns⁻¹ and consequently a dielectric constant between 46 and 72.

The first radargram is shown in *figure 3a* and was processed with an Automatic Gain Control. There is available information down to a depth of 3.4 m. Reflectors show clear patterns such as on-lap and off-lap figures. Several strong reflectors with a north-east dip are also visible and one in particular at a depth of 3.2 m. Horizontal reflectors are due to ringing.

Six auger-borings were performed along profile 5 (S0 to S25) and showed the presence of reduction material (charcoal) and also organic matter. In particular, three levels named H, K and O can be correlated from one drilling to the other. They can be associated with settlements from the Late Neolithic era. These levels are detected between point S5 and S25 and their depth increases with distance from the shore.

The superposition between the stratigraphic log obtained from drillings and the radar reflectors has enabled a good correlation to be made between them. In particular, the oldest level named O (Horgen culture, 32nd century BC) corresponds to the strongest and the deepest radar reflector. This demonstrates that it is possible to detect and map the O strata and the more recent levels without destruction.

The second profile (*figure 3b*) was done in order to test the ability of radar profiling over several meters of water (up to 6 m). Radar waves seem to propagate over a depth of 100 ns (2 m) and the level associated with the C level was detected.

The use of radar in archaeology is now well-established (Vaughan, 1966; Imai et al., 1987). It can be used with ease in the case of pit deposits (Ulriksen, 1982) or depositional levels (Lowe, 1985; Smith, Jol, 1992; Haeni, 1996). To our knowledge, it has only been used once before in lacustrine conditions (Leckebusch, 1998). If the use of radar in the Chalain area is clearly relevant, the detectability of a level with a centimetric vertical extension was far more unlikely. On the one hand, the dielectric contrast between levels which are nearly saturated with water is clearly small. On the other hand, using a 100 MHz antenna, the wavelength in a medium with a 70 dielectric constant is 40 cm. If we take the object dimension to be a quarter of the wavelength, the vertical extension must be at least 10 cm. If we had used a frequency of 200 MHz to attain a 5 cm resolution, the depth of investigation would have been too small.

In most cases, the effect of conductivity is neglected in radar studies. Measurements on the cores have shown a conductivity variation of 70 % between the O level and the chalk deposits. Recent computations (Lazaro-Mancilla and Gomez-Trevizo, 1996) have shown that the reflection due to a thin layer (1 cm in their example) is equivalent to the reflection due to a simple contrast between two dielectric mediums. We think that what we observed originates more probably in a contrast of conductivity than of dielectric constant contrast.

In summary, this case study shows that, with a sufficiently low frequency antenna, it is possible to detect anthropic levels within chalk deposits in a lake and to determine their depth and lateral extension. It would then be possible, by making a high resolution GPR survey with a dense sampling scheme, to map the extent of archaeological deposits three dimensionally over 6 000 years, without destruction of the site.

1. Introduction. Contexte

Le lac de Chalain (Jura, France) (*figure 1*) constitue un exemple remarquable d'un bassin lacustre enchâssé dans un plateau calcaire. Les séquences stratigraphiques de plus de 29 sites archéologiques découverts dans la frange littorale (entre les altitudes 484 et 489 m) ont montré une excellente conservation des vestiges d'habitats littoraux préhistoriques. Elles ont pu permettre une reconstruction précise des phases du Néolithique final entre -3 200 et -2 400 ans av. J.-C. (Pétrequin et al., 1997).

Les occupations néolithiques sur la rive occidentale du lac de Chalain se regroupent en deux pôles géographique distincts, correspondant à deux pôles de l'organisation sociale. La fouille de la zone nord (« Prise d'Eau ») a montré une succession d'habitats littoraux sur une période s'étendant de -3 200 (colonisation Horgen moyen issue de Suisse occidentale) jusqu'à -2 600 (culture de Chalain). 800 m plus au sud, dans la zone de « l'Îlot sous Doucier », une prospection par sondages carottés (Pétrequin et Pétrequin, 1996) a révélé un second ensemble de sites. C'est à cet ensemble qu'appartiennent les deux stations prospectées par la méthode radar-sol : la station CH-19, correspondant à une presqu'île barrée, et la station CH-20, située sous le niveau actuel des eaux du lac (484 m).

Chaque site fouillé a montré une séquence stratigraphique complexe (succession de plusieurs niveaux d'occupation à l'intérieur de chaque séquence), avec des vestiges organiques (généralement plus sombres) parfaitement conservés dans les craies lacustres. Pour mettre en évidence ces séquences, l'archéologue dispose de deux moyens : le décapage systématique d'une zone, horizon par horizon, et les sondages mécaniques carottés. Si la fouille permet d'analyser dans les moindres détails les relations chrono-stratigraphiques et spatiales, elle ne peut en revanche concerner, sur des sites d'ambiance humide, qu'un volume très restreint du sol. Les sondages au carottier, sonde russe GYK notamment, même s'ils sont bien adaptés à une description très fine des stratigraphies dans les sédiments meubles, ne peuvent être multipliés à l'infini sur d'aussi larges surfaces, et l'extrapolation des observations entre chaque point de sondage demeurera toujours problématique.

L'objectif de la prospection radar sol à Chalain est de caractériser, de façon non destructive et de manière moins discontinue que ne le font les forages, la géométrie des différentes strates archéologiques et/ou sédimentaires reconnues dans le remplissage du lac.

Par rapport aux prospections déjà réalisées dans un but archéologique ou même de génie civil, cette prospection présente une autre originalité, liée aux conditions particulières de fossilisation de ces habitats littoraux : par le jeu des fluctuations du niveau du lac, des vestiges se trouvent maintenant immergés sous une tranche d'eau de plusieurs mètres. Une partie de la prospection radar doit donc se dérouler à la surface de l'eau, pour espérer détecter certains niveaux et « suivre » des réflecteurs profonds dans la zone de transition entre la berge et le lac.

2. Méthode

La méthode de prospection radar repose sur l'étude de la propagation et des réflexions d'impulsions électromagnétiques (radar pulsé). Dans la plupart des milieux géologiques, les propriétés électriques constituent les paramètres essentiels de la propagation. Les réflexions sont créées par des contrastes d'impédance électromagnétique dans le sol, se simplifiant souvent en contrastes de permittivité diélectrique.

Le choix de la fréquence optimale se fait suivant trois contraintes principales :

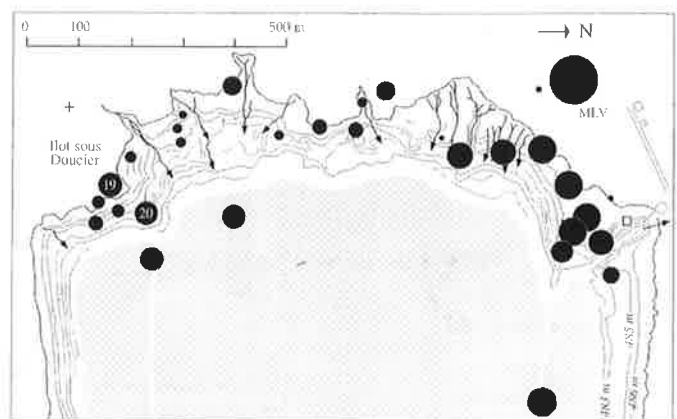
- 1) la capacité à distinguer deux interfaces horizontales voisines,
- 2) la capacité à séparer la cible recherchée des hétérogénéités de taille quelconque,
- 3) la section efficace de la cible, qui doit être de taille suffisante par rapport à l'ouverture du faisceau incident.

Comme règle pratique, on peut choisir de prendre le produit profondeur (en m) x fréquence (en MHz) proche de 500 (Annan, 1992).

Le radar utilisé est un PulseEKKO 100 de la société Sensors and Software. Des essais de terrain nous ont conduits à privilégier la fréquence de 100 MHz. Dans les conditions du site, celle-ci permet théoriquement une investigation maximale de 5 m et une résolution spatiale

Figure 1. Position des sites CH-19 et CH-20 dans le contexte des habitats littoraux connus (Pétrequin, 1996).

Position of the sites CH19 and CH20 within the context of the known lake side dwellings (Pétrequin, 1996).



de 10 cm. Le signal reçu sur l'antenne réceptrice est échantillonné tous les 800 ps sur une fenêtre de 180 ns et forme ce que l'on appelle une trace.

3. Données et résultats

Lors d'une première mission, trois profils (figure 2) ont été réalisés sur la berge, parallèlement au rivage, et six autres ont été mesurés dans une orientation perpendiculaire au rivage, à cheval entre la berge et le lac. Les antennes radar avaient été installées sur un ponton en bois, tiré dans l'eau par un opérateur. Au cours d'une seconde mission, un long profil, appelé transect 5, a été acquis depuis la surface du lac, en posant le radar et les antennes sur le plancher d'une barque à fond plat. Ce profil prolongeait jusqu'à 108 m un profil commencé lors de la première mission (point 25 à une longueur 35 m).

Les mesures sont déclenchées à la main, tous les 20 cm, pour la partie du profil à terre. Pour la partie sur le lac, la direction est donnée en suivant un cap ; la distance est mesurée par un fil perdu dont le déroulement déclenche la mesure avec un intervalle identique. Une analyse de vitesse évalue la vitesse moyenne de propagation dans ce milieu entre 4 et 5 $\text{cm}\cdot\text{ns}^{-1}$, soit une constante diélectrique relative moyenne entre 46 et 72.

La figure 3a représente la coupe radar acquise sur la plate-forme carbonatée et traitée en gain AGC. L'échelle des profondeurs est calée sur une vitesse moyenne de 4 $\text{cm}\cdot\text{ns}^{-1}$. Avec celle-ci, la coupe montre de l'information cohérente jusqu'à 3,4 m de profondeur. On constate que la forme des réflecteurs les plus superficiels dessine des figures sédimentaires telles que des biseaux d'aggradation

(*on-lap*) et des structures de progradation (*off-lap*), caractéristiques d'une succession de séquences de dépôts, mises en place par le jeu des variations du niveau du lac. On peut remarquer également la présence de nombreux réflecteurs pentés (pendage nord-est), bien différenciés, dont un particulièrement énergétique en profondeur (à 3,2 m de profondeur en S25). Les signatures horizontales (*ringing*), visibles en profondeur, traduisent le défaut de couplage (adaptation d'impédance) entre le sol et l'antenne. Nous avons choisi de ne pas filtrer ces bruits, puisqu'ils ne masquaient pas d'information essentielle à cette profondeur.

Six sondages carottés ont été effectués préalablement le long de ce profil (S0 à S25), jusqu'à une profondeur de 3 m. Ils ont mis en évidence un ensemble important de niveaux de réduction (charbon) et de matière organique, correspondant à des occupations archéologiques bien visibles au sein de la craie blanche lacustre. En particulier, trois niveaux, H, K et O, peuvent être suivis d'un forage à l'autre ; ils correspondent aux occupations du Néolithique final (cultures de Horgen et de Clairvaux ancien). Ces couches, détectées entre S5 et S25, s'approfondissent au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la rive actuelle du lac, pour atteindre une profondeur comprise entre 1,8 et 3,0 m pour la couche la plus ancienne (Horgen), et entre 1,2 et 2,2 m pour les couches H et K.

La superposition des logs stratigraphiques sur le pointé des principaux réflecteurs permet d'associer (« caler ») des réflecteurs radar aux trois niveaux H, K et O. On constate, en particulier, que le niveau le plus ancien O (xxx^e siècle av. J.-C.) correspond au réflecteur le plus énergétique. Ce réflecteur matérialise le contact entre le milieu sédimentaire « naturel », sous-jacent à la couche O, et le

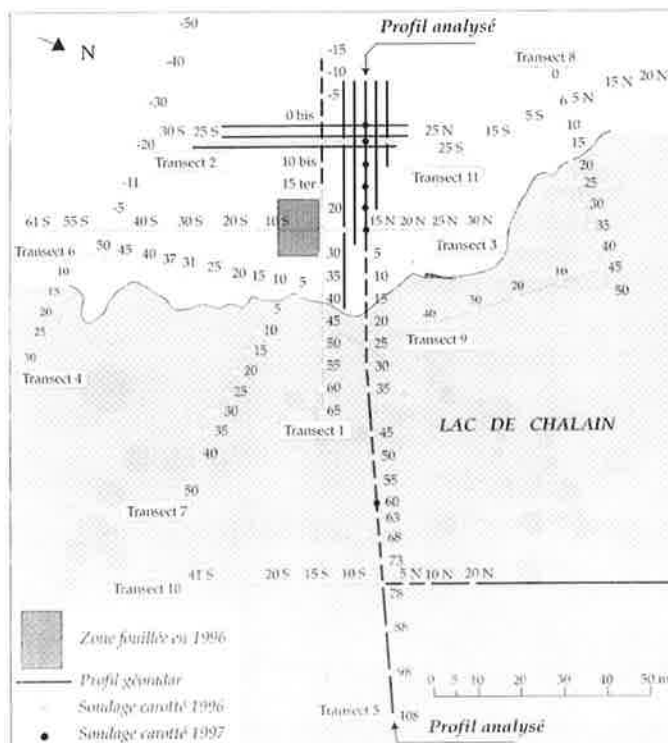


Figure 2. Localisation des sondages et des profils radar (en gras), d'après Pétrequin (1996), modifié.

Location of the core drillings and GPR profiles (in bold), modified after Pétrequin (1996).

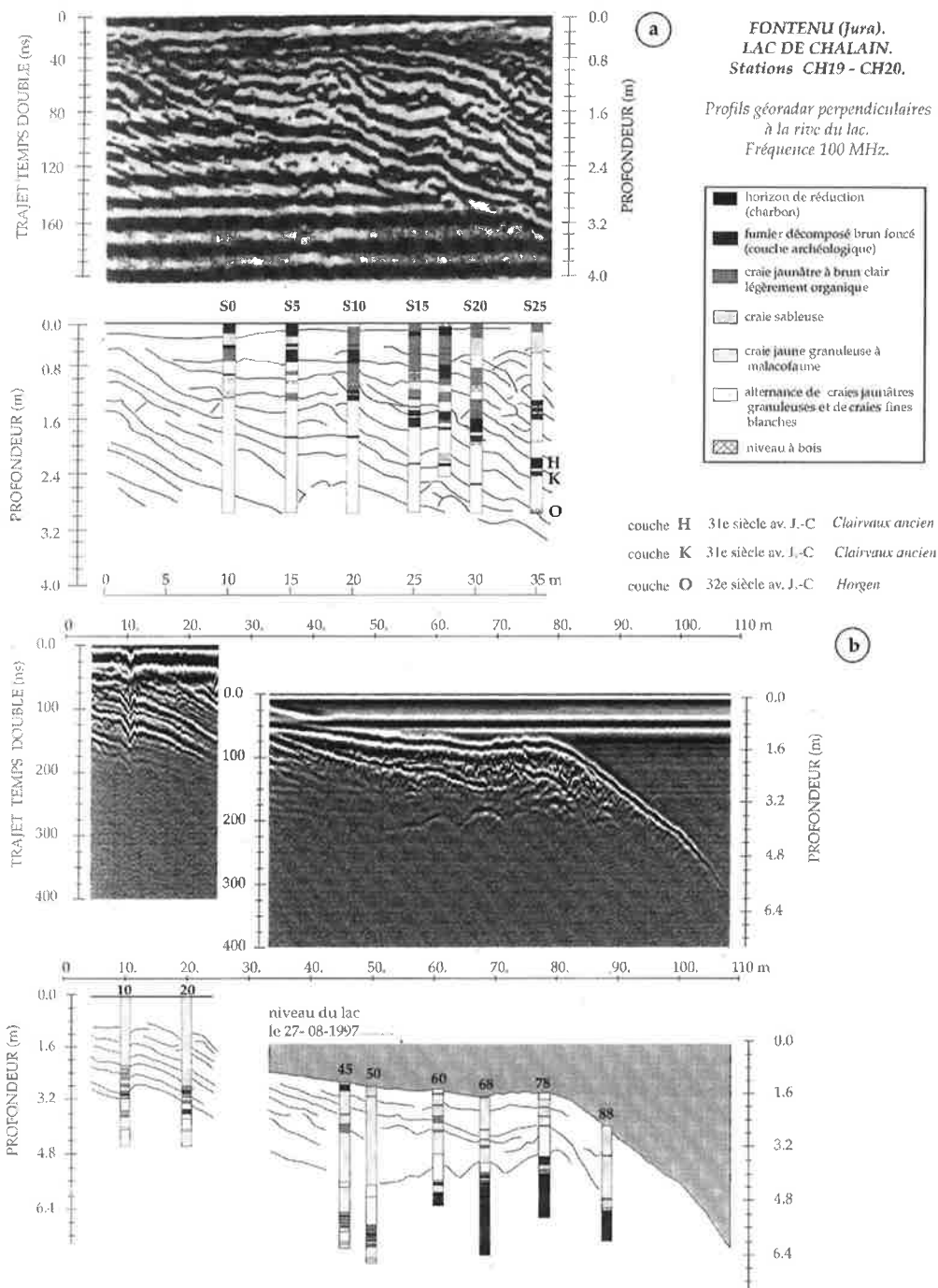


Figure 3. a. Profil radar sur berge du lac (transect 5). Superposition des réflecteurs radar les plus importants et des sondages carottés. b. Profil radar à la surface du lac (transect 5). Superposition des réflecteurs radar les plus importants et des sondages carottés.

a. Radar profile across the shore of the lake (transect 5). Superposition of main reflective layers together with core drillings.
b. Radar profile from the lake surface (transect 5). Superposition of main reflective layers together with core drillings.

milieu sédimentaire « anthropisé », où l'impact des occupations littorales sur la sédimentation se marque par les épandages organiques (fumiers) et les couches de destruction. Le choix d'une vitesse de propagation, identique à la fois latéralement et en profondeur (isotropie), semble parfaitement justifié au vu du calage de la couche O sur les forages S5, S10, S15, S20 et S25. La couche n'a pas été décelée sur le sondage S0, bien que le réflecteur apparaisse parfaitement continu jusqu'à ce point. Les sondages ayant été effectués avant le profil radar, il est possible que ce niveau soit passé inaperçu. Cette section montre qu'il est possible, grâce aux réflecteurs radar, de préciser, de

façon continue et non destructive, la géométrie de cette couche O le long du profil, mais aussi celle de couches plus récentes.

Le second profil (figure 3b) a été acquis afin de tester la capacité du radar à suivre certains réflecteurs sous une tranche d'eau d'épaisseur importante (plusieurs mètres). L'acquisition a donc été prolongée jusqu'à une profondeur d'eau de 8 m. L'onde radar semble pénétrer dans le sédiment correctement sur 100 ns en temps double (soit 2 m) et deux réflecteurs semblent particulièrement bien marqués. Le réflecteur le plus profond pourrait être associé au toit de la couche de la couche C, qui marque le début

des dépôts archéologiques. Au-delà de 6 m de profondeur, on n'enregistre plus aucun signal et même la réflexion à l'interface eau-sédiment n'est plus visible sur la section.

4. Discussion

L'utilisation du radar est déjà relativement ancienne en archéologie (Vaughan, 1986 ; Imai et al., 1987). Il est tout particulièrement adapté à la détection des niveaux de tourbe (Ulriksen, 1982) ou des formes sédimentaires dans les milieux deltaïques et/ou lacustres (Lowe, 1985 ; Dott, 1990 ; Smith et Jol, 1992 ; Haeni, 1996).

À notre connaissance, il n'a été utilisé qu'une seule fois pour une prospection archéologique en milieu lacustre (Leckebusch, 1998). Si le recours à la méthode se révèle pertinent au lac de Chalain, avec notamment la mise en évidence de la couche O, il reste clair que les chances de détecter une couche d'aussi faible épaisseur (5 cm) étaient a priori nulles en fonction des critères généralement admis actuellement. L'énergie de la réflexion radar attendue pour ce niveau O, ainsi que sa détection, étaient théoriquement très difficiles, si ce n'est impossible, pour deux raisons :

- d'une part, la vitesse de propagation évaluée permet de proposer une constante diélectrique relative du sédiment de 70 : on aurait donc pu s'attendre à un contraste des constantes diélectriques faible, et donc à une réflexion peu énergétique entre la craie lacustre et les niveaux organiques archéologiques, tout aussi saturés en eau ;
- d'autre part, l'épaisseur de cette couche O mesurée sur les carottes est inférieure à 5 cm ; avec la fréquence utili-

sée de 100 MHz, la longueur d'onde dans un milieu de constante diélectrique 70 est de 40 cm ; si l'on admet que l'objet doit être, dans le meilleur des cas, d'une dimension supérieure au quart de la longueur d'onde, cela équivaut à une épaisseur de 10 cm ; il aurait donc fallu au moins doubler la fréquence pour atteindre la résolution de 5 cm, mais la profondeur d'investigation aurait été insuffisante.

Dans la grande majorité des études radar, l'effet des variations de conductivité électrique est négligé. Des mesures sur les carottes ont montré que la conductivité des strates organiques, dont la couche O, est en moyenne de 70 % plus élevée que celle des sédiments crayeux. Des modélisations théoriques récentes (Lazaro-Mancilla et Gomez-Trevino, 1996) ont montré que la réflexion radar due à une fine couche conductrice (1 cm dans leur modélisation) était équivalente à la réflexion due à un contraste unique de constante diélectrique entre deux milieux. Il est donc très probable que les réflexions radar que nous avons observées soient liées aux contrastes de conductivité du milieu et non aux seuls contrastes de la constante diélectrique.

Cet essai d'application du radar-sol sur le lac de Chalain et sa frange littorale montre que, même avec une fréquence suffisamment basse, mais nécessaire, il est possible de détecter des niveaux anthropiques du Néolithique dans les craies lacustres, d'en préciser la profondeur et l'étendue spatiale. En systématisant sur le site l'acquisition de profils à **très haute résolution**, on peut dès lors envisager de restituer **dans les trois dimensions** la géométrie des différentes couches archéologiques et/ou sédimentaires, accumulées sur les rives du lac depuis 6 000 ans.

5. Références

Dott E.R. 1990. Stratigraphy and lake level history of a beach ridge complex at Two Rivers, Wisconsin, on the Northwest shore of Lake Michigan, *Master's*, University of Wisconsin-Madison, USA

Haeni F.P. 1996. Use of ground-penetrating radar and continuous seismic-reflection profiling on surface-water bodies in environmental and engineering studies, *J. Env. Eng. Geophys.*, 1 (1), 27–35

Imai Y., Sakayama T. et Kanemori T. 1987. Use of ground-probing radar and resistivity surveys for archaeological applications, *Geophysics*, 52, 137–150

Lazaro-Mancilla O. et Gomez-Trevino E. 1996. Synthetic radargrams from electrical conductivity and magnetic permeability variations, *J. Appl. Geophys.*, 34, 283–290

Leckebusch J. 1998. Georadar in Binnengewässern, in : *Archäologie unter Wasser*, VML Verlag Marie Leidorf GmbH, Rahden/Westf., 81 p.

Lowe D.J. 1985. Application of impulse radar to continuous profil-

ing of tephra-bearing lake sediments and peat; an initial evaluation, *New Zeal. J. Geol. Geop.*, 28, 667–674

Pétrequin P. 1997. *Les sites littoraux néolithiques de Clairvaux-les-lacs et de Chalain (Jura). III. Chalain station 3, 3200–2900 av. J.-C.*, volume 1, sous la direction de Pierre Pétrequin, Éditions de la MSH, Paris

Pétrequin A.M. et Pétrequin P. 1996. *Fontenu (Jura). Lac de Chalain, station 19, Rapport de fouille programmée : première année*, Service régional de l'archéologie de Franche-Comté, 19 p.

Smith D.G. et Jol H.M. 1992. GPR results used to infer depositional processes of coastal pits in large lakes, in : *Fourth Int. Conf. On GPR*, Geological survey of Finland, 169–177

Ulriksen P. 1982. Application of impulse radar to civil engineering, *Thesis*, Lund University, 176 p.

Vaughan C.J. 1986. Ground-penetrating radar surveys used in archaeological investigations, *Geophysics*, 51, 595–604

Widess M.B. 1973. How thin is a thin bed?, *Geophysics*, 1176–1180