

Contribution des méthodes géophysiques (électrique, électromagnétique et radar sol) à l'étude des dépressions lacustres : l'exemple du Lautrey (Jura, France)

Autor(en): **Bossuet, Gilles / Camerlinck, Christian / Dabas, Michel**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Eclogae Geologicae Helvetiae**

Band (Jahr): **93 (2000)**

Heft 2

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-168813>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Contribution des méthodes géophysiques (électrique, électromagnétique et radar sol) à l'étude des dépressions lacustres. L'exemple du Lautrey (Jura, France)

GILLES BOSSUET¹, CHRISTIAN CAMERLINCK², MICHEL DABAS² & JACQUES MARTIN³

Key words: Lacustrine infillings, geophysical prospecting, dc resistivity methods, Slingram methods, Ground Penetrating Radar (GPR)
Mots clés: Remplissage lacustre, prospection géophysique, méthodes électrique, électromagnétique, radar sol

ABSTRACT

A geophysical exploration involving several methods - dc resistivity methods, Slingram conductivity mapping (EM31) and Ground Penetrating Radar (GPR) lines - was carried out on the peat bog of Le Lautrey (Jura, France). This geophysical exploration completes advantageously the punctual observations deduced from 44 bore-holes about the topography of this basin. Thanks to the complementary investigation depth of these methods in the range 0-15 m, it was possible to recognise the substrate morphology of this lacustrine basin and to precisely outline the variations of the thickness of lacustrine infillings over an area of 10 hectares. The dip (10° SE) of the limestones relief and the topographic irregularity due to fractures generate the thickness variations of the infillings. Three lacustrine sub-basins separated by an uplifting of the portlandian limestones were observed. The spatial extent of a drainage paleochannel running to the exurgence have been detected. The geophysical data, added to the geological information show that the post glacial lake does not directly result from the glacier advance. It is mainly due to the tectonic structure of the area and to the impervious purbeckian marl, both factors generating the development of the lacustrine sub-basins.

RESUME

Sur la tourbière de l'étang du Lautrey (Jura, France), trois campagnes de prospection géophysique ont été successivement organisées : sondages électriques, cartographie électromagnétique de la conductivité (EM31) et profils radar. Les résultats géophysiques obtenus complètent avantageusement les observations ponctuelles fournies par 44 forages carottés sur la topographie du bassin. Grâce à la complémentarité des méthodes utilisées dans l'exploration des quinze premiers mètres du sous-sol, il a été possible de reconnaître sur une dizaine d'hectares, la paléotopographie du substrat de la dépression et les variations d'épaisseur du remplissage lacustre. L'extension latérale de trois cuvettes séparées par une remontée des calcaires portlandiens et l'emprise d'un paléochenal conduisant à l'exutoire du lac postglaciaire ont pu être très précisément délimitées. Ces résultats associés aux données géologiques suggèrent, qu'en l'absence de surcreusement glaciaire clairement identifiable, la formation de ces trois cuvettes à fond étanche aurait été principalement déterminée par la structure tectonique du secteur et la présence des marnes purbeckiennes assurant la perméabilité du substrat.

I. INTRODUCTION

L'exploration du sous-sol sur la gamme de profondeur 0–20 m est l'une des principales applications des méthodes géophysiques à l'étude de l'environnement «sous sol» et ce pour une grande variété de contextes d'études (Travaux Publics, Génie Civil,...).

Pour la reconstitution des environnements passés, les complexes sédimentaires piégés dans les anciens lacs constituent des sites privilégiés. Dans la pratique, une connaissance préliminaire de la morphologie de ces cuvettes lacustres, conditionne étroitement la stratégie d'exploration de ces sites et le choix des lieux de prélèvement des échantillons (Bossuet 1997, Buoncristiani et al. 1996).

Cette connaissance se fonde, pour l'essentiel, sur le couplage des forages mécaniques, avec les méthodes géophysiques. Dans l'étude des formations superficielles lacustres, les possibilités d'investigation par les méthodes géophysiques peuvent être compliquées voire, dans le cas des méthodes haute résolution comme le radar sol, carrément limitées par le développement des sols hydromorphes organiques (tourbes), et par celui d'une sédimentation argilo-silteuse, particulièrement défavorable à une bonne pénétration des ondes émises (Ulriksen 1982, Nobes et Warner 1992, Theimer et al. 1994, Roberts et al. 1997). Ces limitations, qui découlent des propriétés physiques des sols, imposent alors d'utiliser des méthodes géophysiques,

¹ Laboratoire de Chrono-Ecologie, UMR 6565 du CNRS, UFR des Sciences et Techniques, 25030 Besançon Cedex, France

² Département de Géophysique Appliquée, UMR 7619 Sisyphé du CNRS, Université P. & M. Curie, 75252 Paris Cedex 05, France

³ Laboratoire de Géo-sciences, UFR des Sciences et Techniques, 25030 Besançon Cedex, France

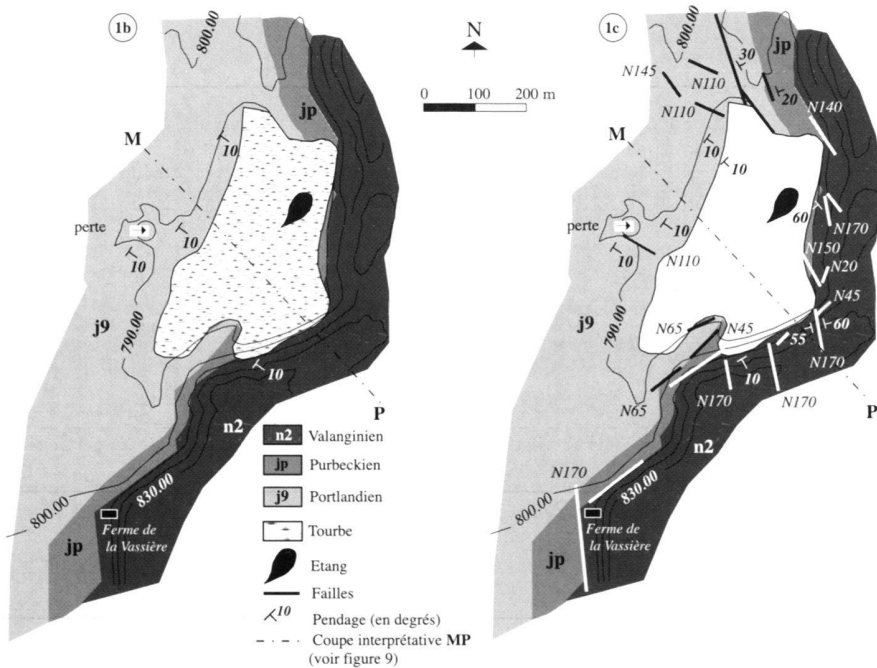
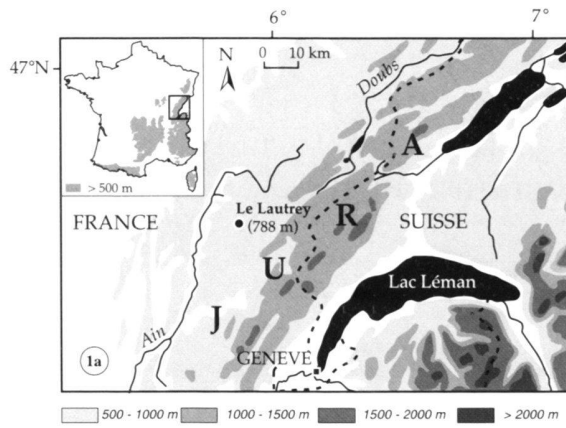


Fig. 1. a. Localisation du site étudié.
Location of the study area

b. Cadre géologique du site étudié.
Geological map of the study area.

c. Localisation des observations de terrain.
Location of the field observations.

complémentaires en terme de profondeur d'investigation, pour pouvoir réaliser une exploration efficace de la tranche du sous-sol concernée par les recherches.

Dans le domaine paléoenvironnemental, l'étude des sites de tourbières de grandes superficies à partir de plusieurs méthodes géophysiques demeure cependant une opération peu fréquente compte tenu des conditions très contraignantes d'acquisition des mesures dans ce type de zone humide (couvert végétal spécifique, sol gorgé d'eau).

L'exemple original d'application que nous présentons concerne la tourbière de l'étang du Lautrey (Bonlieu, Jura, France); cette dépression d'une dizaine d'hectares a fait l'objet de plusieurs campagnes de prospection géophysique (sondages électriques, cartographie électromagnétique EM-31 de la

conductivité, et profils radar) destinées à compléter les observations ponctuelles fournies par 44 forages carottés. L'article présente les résultats apportés par chacune des méthodes géophysiques et leur complémentarité pour la reconnaissance de la paléotopographie du substrat de cette dépression et la mise en évidence des variations d'épaisseur de son remplissage.

II. CONTEXTE GEOLOGIQUE

D'une superficie de 1900 m², l'étang du Lautrey (46° 35'14" N, 5° 51'50" E) occupe, au SE de Bonlieu (Jura), le centre d'une dépression tourbeuse située à 788 m d'altitude, dans la zone de contact des plateaux jurassiens avec la haute chaîne plissée (Fig. 1a).

Cette dépression de dimension pluri-hectométrique (500 × 200 m environ) est creusée dans le substrat mésozoïque (Jurassique / Crétacé), en partie comblée par des dépôts lacustres d'âge quaternaire, servant eux même de support à cet étang résiduel. Le relief sur lequel cet ancien lac s'est installé est celui d'une structure monoclinale: la dépression est incisée dans les couches terminales du Jurassique supérieur, visibles à l'affleurement sur les bordures NW et SE de la tourbière (Fig. 1b). Du fait d'un pendage de 10° environ vers le SE de cette structure monoclinale, c'est la base du Crétacé (Valanginien inférieur) qui affleure du côté E de la dépression. Les marnes purbeckiennes visibles au N et au S du secteur disparaissent sous le remplissage lacustre dont elles constituent une partie du substrat. L'origine de cette dépression pourrait être liée à un surcreusement glaciaire, comme le suggère sa position, en contre bas d'un relief anticlinal situé à l'amont des flux glaciaires würmiens.

L'examen des photographies aériennes et nos observations de terrains (Fig. 1c) font apparaître plusieurs directions de fracturations que l'on peut regrouper en deux ensembles:

- d'une part des failles à effet décrochant généralement senestre, pratiquement subméridiennes au S du Lautrey (ferme de la Vassière) et orientées de N170 à N150 à l'E et au N de l'étang du Lautrey
- d'autre part, plus ou moins conjuguées aux précédentes, des failles orientées N50 à N65 visibles essentiellement au S de l'étang, et jouant en failles normales abaissant le compartiment NW.

En tenant compte du pendage des couches inclinées vers le SE, le double jeu en failles décrochantes et failles normales conduit à la formation de panneaux basculés vers le SE.

La nature et la géométrie du remplissage de la dépression ont été reconnues à partir de 44 forages carottés (sonde russe GYK) exécutés antérieurement et postérieurement à l'étude géophysique (Fig. 2). L'épaisseur maximale du remplissage reconnue par ces forages atteint 12 m. La stratigraphie montre une séquence-type de comblement avec:

- à la base des dépôts détritiques constitués d'abord de limons argileux laminés, puis de deux couches de limons argileux séparés par un dépôt biochimique de craie lacustre
- un ensemble médian formé de craies lacustres laminées et de gyttja
- au sommet une couche de sédiments organiques, tourbes, marquant l'atterrissement du site.

La chronologie du remplissage a été établie à partir de l'analyse de son contenu pollinique (Bossuet et al. 1997) en référence à l'histoire de la végétation depuis la dernière glaciation et dont les évolutions sont maintenant bien connues dans le massif jurassien (Wegmüller 1966, Richard 1983, Ruffaldi 1995). Les analyses faites au Lautrey montrent que le remplissage correspond à une accumulation continue de sédiments depuis le retrait du glacier würmien.

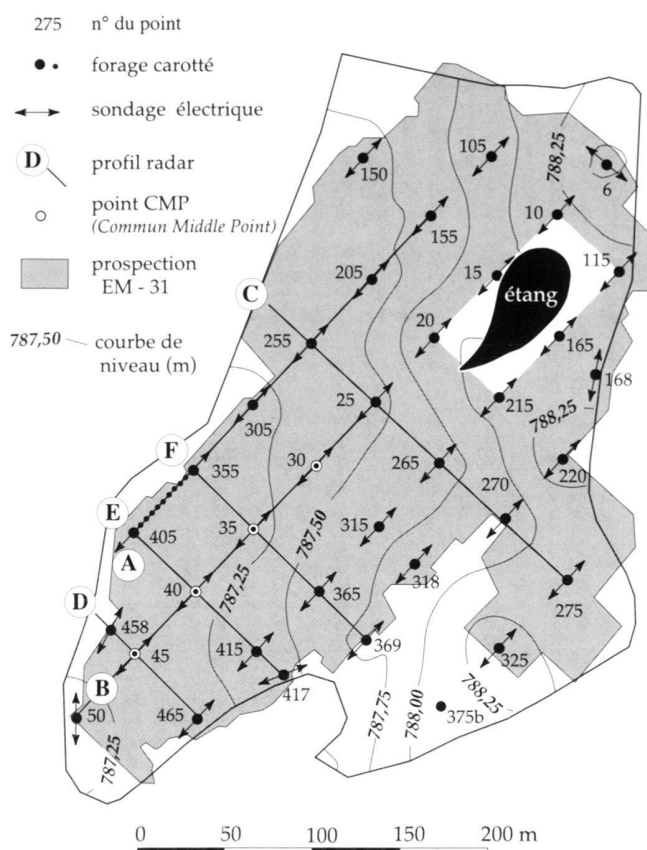


Fig. 2. Localisation des forages carottés et des prospections géophysiques. Location of the bore holes and surface geophysical survey.

III. DONNEES GEOPHYSIQUES

La dépression de l'étang du Lautrey a fait l'objet de trois campagnes de prospection géophysique : une prospection par sondages électriques, une cartographie électromagnétique EM31 de la conductivité et des profils radar.

1. Prospection électrique

La méthode électrique a été choisie en raison de l'existence d'un contraste marqué entre les calcaires du Portlandien et les sédiments à texture fine du remplissage lacustre, saturés en eau, donc électriquement conducteurs. Une étude des variations verticales de la résistivité électrique du sous-sol, (sondage électrique), devait permettre de déterminer, avec une marge d'erreur réduite, l'épaisseur du remplissage et de fournir une cote très précise du toit des calcaires.

1.2 Résultats électriques

Cette première prospection (Bossuet 1997) a consisté en l'exécution de 35 sondages électriques par le dispositif Schlumber-

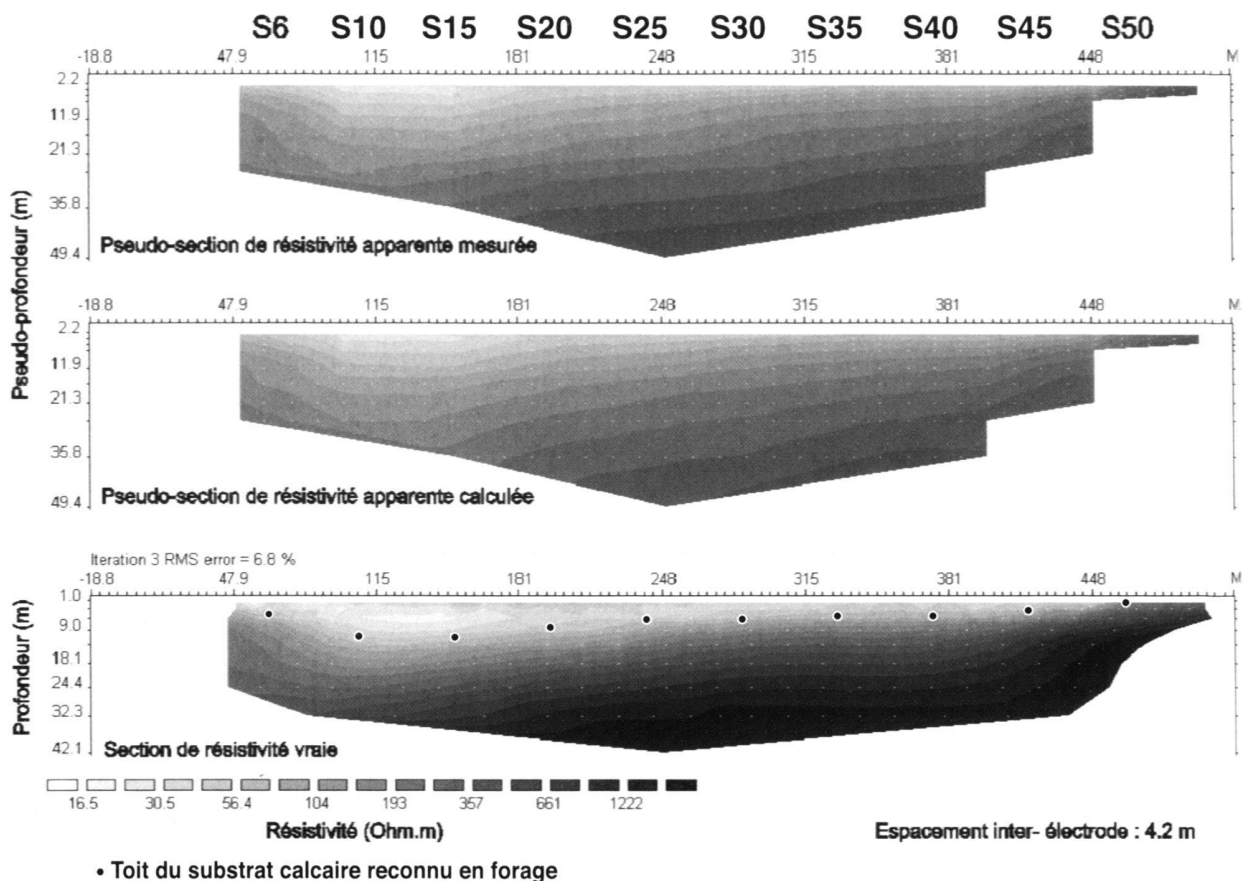


Fig. 3. Interprétation par le logiciel RESDINV (inversion 2D) de la pseudo-section de résistivité S6-S50 dans l'axe longitudinal de la cuvette du Lautrey. Interpretation by RESDINV software (2D inversion) of the geoelectric cross section S6-S50 along the longitudinal line of the basin of Le Lautrey.

ger (Fig. 2); les sondages électriques étaient implantés tous les 50 m sur un réseau maillé couvrant la surface de la tourbière (10 ha). La valeur maximale de AB/2 choisie était de 100 m, ce qui permettait une investigation verticale du sous-sol variant de la surface jusqu'à une quarantaine de mètres de profondeur.

1.2.1 Structure du sous-sol associée aux variations de la résistivité

La structure du sous-sol a été reconnue à partir de pseudo-sections visualisant la distribution des résistivités dans un plan vertical. La figure 3 représente la pseudo-section de résistivité construite dans l'axe longitudinal de la dépression, entre les points S50 et S6. L'inversion des données en 2 D a été réalisée avec le logiciel RES2DINV (Loke & Baker 1996) pour un écartement entre les électrodes de 4,2 m.

Sur la modélisation Schlumberger, le remplissage lacustre apparaît, tous faciès confondus, comme un terrain électriquement conducteur, de résistivité $<$ à 56 Ω m. Le fort gradient ob-

servé en profondeur, de 56 à plus de 1000 Ω m, correspond à l'influence progressive des calcaires portlandiens sous-jacents. Depuis le sondage S50 où le substrat est en position sub-affleurante, les courbes plongent en direction de l'étang selon une pente figurant le toit des calcaires pour remonter ensuite au niveau du sondage S6. L'approfondissement maximal se rencontre, à l'aplomb des sondages S10 et S15, près de l'étang résiduel, où l'épaisseur des sédiments lacustres atteint 12 m.

1.2.2 Morphologie de la cuvette lacustre

Cette morphologie a été proposée à partir des modèles géophysiques fournis par l'interprétation quantitative des 35 sondages électriques (logiciel IGA-SONDEL). Le paramétrage des sondages électriques effectué sur 4 forages carottés S40, S30, S20 et S10 montre une bonne qualité de l'ajustement des modèles interprétatifs aux mesures (Fig 4). Le modèle géophysique retenu montre la séquence suivante:

- à la surface des résistivités de 30 à 50 Ω m pour un horizon (humus et tourbe) dont l'épaisseur n'excède pas 50 cm

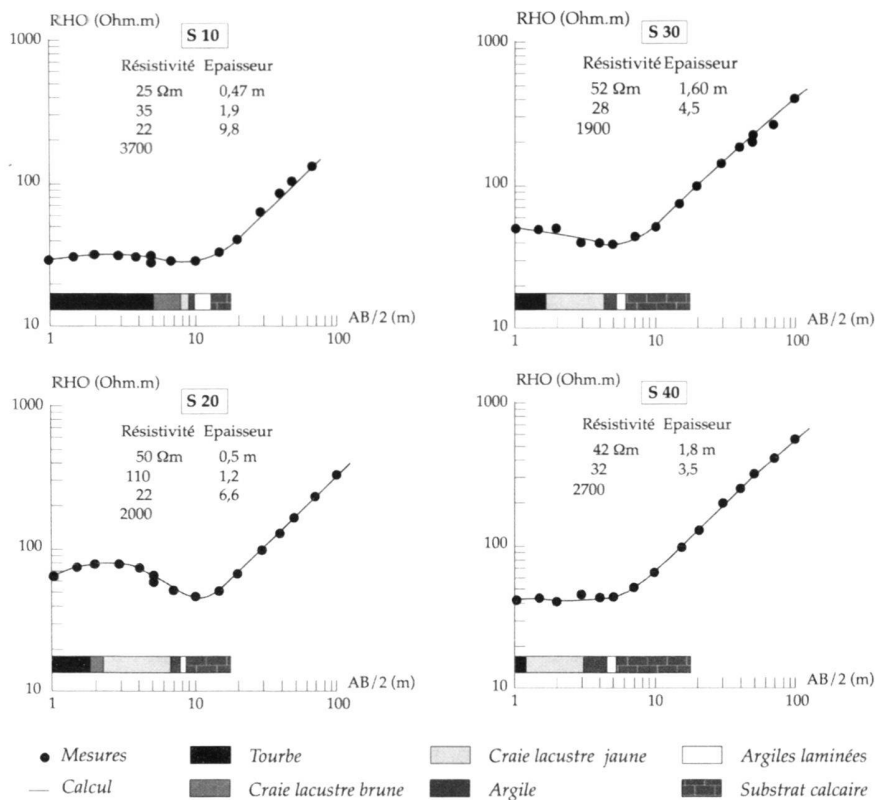


Fig. 4. Mesures, courbes, modèles interprétatifs des sondages électriques S10 à S40 et colonnes stratigraphiques.

Field-data points, computed sounding curves and geoelectric Earth models from direct-current-resistivity soundings S10–S40 and well logs.

- un horizon plus résistant dont les variations de résistivité (entre 35 et 200 Ω m) sont à mettre en relation avec la teneur en eau, son degré de minéralisation et la nature des tourbes constituant la plate-forme organique
- un horizon conducteur de résistivité < à 30 Ω m et d'épaisseur comprise entre 2 et 10 m; il représente l'épaisseur cumulée des différents faciès formant le remplissage lacustre (craies, argile et sédiments argilo-silteux). Ces sédiments ne sont pas différenciés en tant que tels, car leur résistivité respective est intermédiaire entre celles des couches encaissantes de telle sorte que l'on observe systématiquement la succession <tourbe> > craie > > argile > > sédiments argilo-silteux; la présence ou l'absence d'une de ces couches ne modifie pas le diagramme du sondage électrique tant que son épaisseur n'est pas suffisante (phénomène de suppression). C'est l'interprétation minimum sans la présence du phénomène de suppression qui a été retenue: la séquence craies, argile et sédiments argilo-silteux constituant une seule couche géoélectrique conductrice de résistivité < à 30 Ω m
- une assise électriquement très résistante, de résistivité > à 1000 Ω m, correspondant aux calcaires portlandiens sur lesquels les sédiments lacustres reposent directement.

La restitution de la surface topographique des calcaires portlandiens (Fig. 5) montre que la tourbière est constituée en réa-

lité de 2 dépressions, l'une complètement comblée, (W), l'autre, (V), centrée sur l'étang et actuellement en phase finale de comblement. La profondeur du substrat, varie de moins de 1 m en périphérie de la tourbière, à plus de 11 m dans ces deux bas fonds. En (X), un troisième approfondissement de 5 m apparaît plus à l'E, au pied de la falaise Crétacé. Le fort gradient que l'on observe entre les courbes isohypses sur le flanc E de la dépression traduit en (Y) la remontée rapide des calcaires portlandiens, qui pourrait s'opérer à la faveur du jeu en failles normales des accidents N50 à N60. A l'inverse, en (Z), la surface des calcaires portlandiens, plongent depuis la bordure W de la dépression, selon une pente faible, de l'ordre de 10°, ce qui atteste que la structure monoclinale se poursuit bien sous le remplissage lacustre selon la même pente topographique.

L'image de la paléotopographie du substrat déduite des modèles géophysiques est en accord avec la représentation des variations d'épaisseur du remplissage reconnues ponctuellement par les forages mécaniques (Fig. 6). On constate que ces variations résultent principalement de la dissymétrie transversale NW/SE du relief des calcaires mais aussi d'irrégularités topographiques qui pourraient être induites par la fracturation.

2. Prospection électromagnétique

Les méthodes électromagnétiques (EM) permettent également l'étude des résistivités des formations du sous-sol. Dans

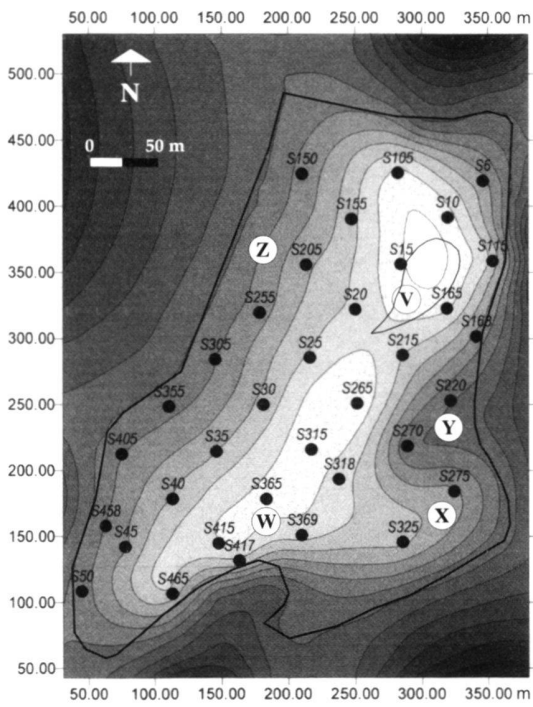


Fig. 5. Isohypes du toit des calcaires portlandiens déduites des sondages électriques.
Isohypes of the top of the portlandian limestones deduced from the electrical soundings.

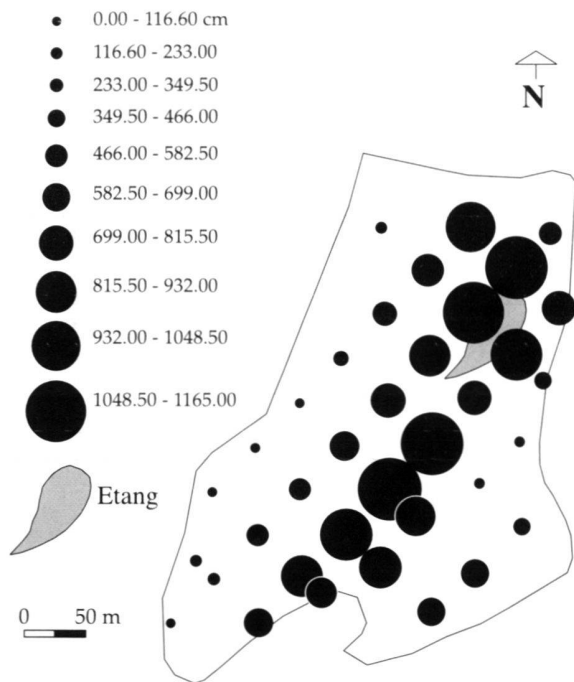


Fig. 6. Variations d'épaisseur du remplissage lacustre reconnues par 35 forages carottés.
Variations of the thickness of infillings deduced from 35 bore-holes.

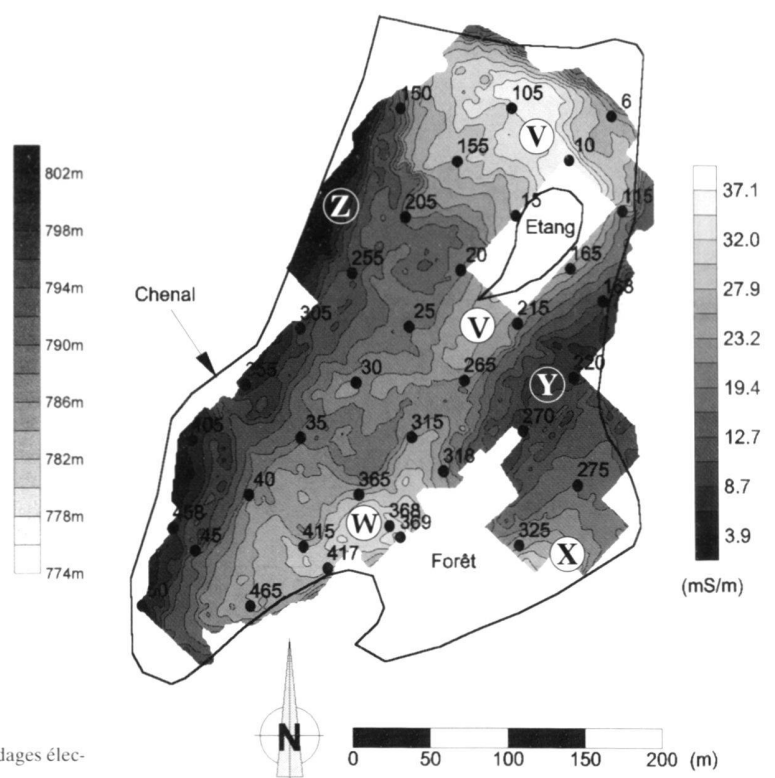


Fig. 7. Carte de la conductivité (mS/m) EM31 en configuration HCP, maille de mesure 5 m x 5 m.
Apparent conductivity map (mS/m) EM31 in HCP configuration, mesh of measurements 5 m x 5 m.

le cas des méthodes EM, le courant est oscillant et donc associé à des ondes électromagnétiques; c'est par induction et non plus par l'intermédiaire d'électrodes qu'il est injecté dans le sol. Le choix de l'appareillage s'est porté sur le conductivimètre EM31 de Geonics ($f = 9,8 \text{ kHz}$, $L = 3.66 \text{ m}$) (Mc Neill 1980, Frischknecht et al. 1991), particulièrement bien adapté la couverture rapide de grandes surfaces en milieu électriquement conducteur (Meheni et al. 1996). Les mesures ont été acquises en configuration horizontale coplanaire, HCP. La profondeur d'investigation de l'appareil est alors de l'ordre de 6 m.

Une cartographie des variations de la conductivité apparente du sous-sol (3970 mesures) a été réalisée en mode HCP sur un réseau à maille de 5 m x 5 m. La parfaite reproductibilité des mesures EM-31 entre des campagnes espacées de plusieurs mois a été contrôlée par l'exécution de profils communs facilitant l'assemblage des différentes fractions de la carte (Fig. 7).

2.1 Résultats électromagnétiques

L'étalonnage des gammes de conductivité réalisé sur 35 forages carottés montre que, dans la tranche 0–6/7 m correspondant à la profondeur d'investigation de l'appareil en mode

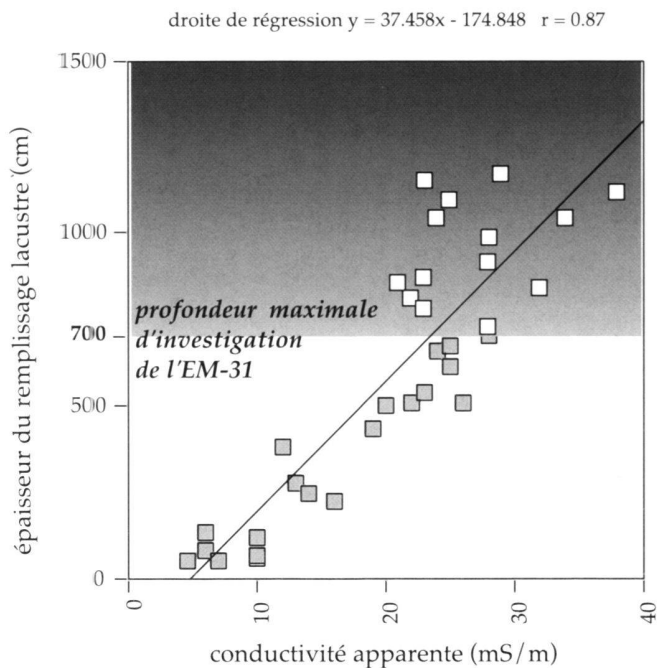


Fig. 8. Relation entre la réponse en mode HCP de l'EM31 et l'épaisseur du remplissage lacustre reconnue dans 35 forages.
Relation between the response of the EM31 in mode HCP and the thickness of the lacustrine infillings from 35 bore-holes.

HCP, la relation conductivité / épaisseur du remplissage lacustre est sub-linéaire, avec un bon facteur de corrélation (Fig. 8).

On en déduit alors que:

- les plages de valeurs les moins conductrices, de 1 à 20 mS/m (millisiemens par mètre) matérialisent les zones où les formations calcaires sont les plus proches de la surface, c'est-à-dire en (Z), sur la bordure W de la tourbière, et en (Y) à l'emplacement des points de sondage électrique et de forage mécanique 270, 220 et 168. L'anomalie centrée sur ces points délimite un compartiment résistant d'orientation NE-SW qui s'interprète comme une remontée du calcaire (portlandien) liée à la présence de la faille. Au N de l'étang, l'inflexion dans le tracé des courbes délimitant l'emprise de la cuvette (V) est induit par la structure tectonique en coins basculés du substrat. La carte des variations d'épaisseur du remplissage lacustre confirme qu'au gradient des courbes d'isoconductivité correspond bien un approfondissement progressif du toit du substratum calcaire qui passe, dans ces zones, de 1 m à plus de 5 m de profondeur
- les valeurs les plus conductrices, de 24 à 38 mS/m, délimitent les zones où la puissance du remplissage lacustre excède 6 m, celles qui marquent l'emprise des bas fonds des 3 cuvettes (V,W,X) reconnues en prospection électrique.

La cartographie électromagnétique, du fait de sa meilleure résolution spatiale, précise l'extension latérale de ces structures et permet également d'en repérer de nouvelles. Ainsi, à hauteur de la perte, entre les points 405 et 355, le maillage suffisamment fin de la carte, révèle sous la forme d'une «digitation» plus conductrice de 20 m de large, l'emprise d'un sillon creusé dans la dalle calcaire (paléochenal?) et qui conduit à l'exutoire du lac postglaciaire.

3. Prospection radar

La méthode de prospection radar, ou GPR (Ground Penetrating Radar) repose sur l'étude de la propagation et des réflexions d'impulsions électromagnétiques, de quelques MHz jusqu'au GHz. 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 contraste de permittivité diélectrique.

Une teneur en eau élevée entraîne souvent une conductivité importante produisant une forte atténuation et une moins bonne pénétration des ondes radar dans le sol, ce qui explique que la méthode soit moins «efficace» dans l'exploration des terrains conducteurs comme les tourbes, les argiles, les limons ou les aquifères poreux. (Ulriksen 1982, Jol & Smith 1991, Nobes & Warner 1992, Theimer et al. 1994).

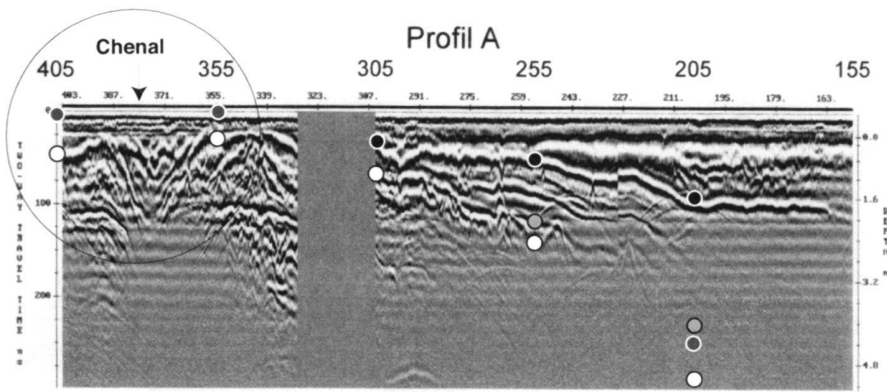
Le radar utilisé est un PulseEKKO 100 de la société Sensors and Software, conçu pour la prospection géologique profonde, avec des antennes de 12,5 à 200 MHz.

3.3 Résultats du radar

Cinq profils (A, B, C, D et E) ont été parcourus à la fréquence 100 MHz et trois profils (A, F et E) à la fréquence 50 MHz (Fig. 2) selon un pas d'échantillonnage de 0,2 m et une distance fixe d'1m entre les 2 antennes d'émission et de réception afin de réaliser une section verticale sous le profil (Fig. 9).

Quatre sondages CMP (Commun Middle Point) ont été effectués aux positions 30, 35, 40 et 45 suivant l'alignement du profil B. L'analyse des sondages CMP permet de déterminer une vitesse de propagation superficielle comprise entre 3,6 et 4 cm/ns. Ces valeurs très basses résultent d'un milieu de surface très saturé et sont compatibles avec les valeurs des vitesses observées habituellement dans les terrains tourbeux. La vitesse de propagation des ondes est en effet inversement proportionnelle à la racine carrée de la permittivité; celle-ci est donc d'autant plus faible que la teneur en eau est grande.

Sur les sections ont été calés les logs stratigraphiques des forages carottés en prenant une vitesse moyenne de 3,8 cm/ns sur l'ensemble de la tranche de profondeur. La visibilité sur les sections dépasse rarement 120 ns, ce qui correspond à une faible profondeur de pénétration, de l'ordre de 3 m environ. Sur l'ensemble des sections, l'interface la plus remarquable est celle du toit des limons carbonatés lorsqu'ils sont sous la couche des tourbes; la base de cette formation se marque par une réflexion



Sections Radar 100 MHz

- Toit des limons carbonatés
- Toit des gyttja/argiles grises
- Toit des sédiments argilo-silteux
- Toit du substratum Portlandien (concassé/dalle)

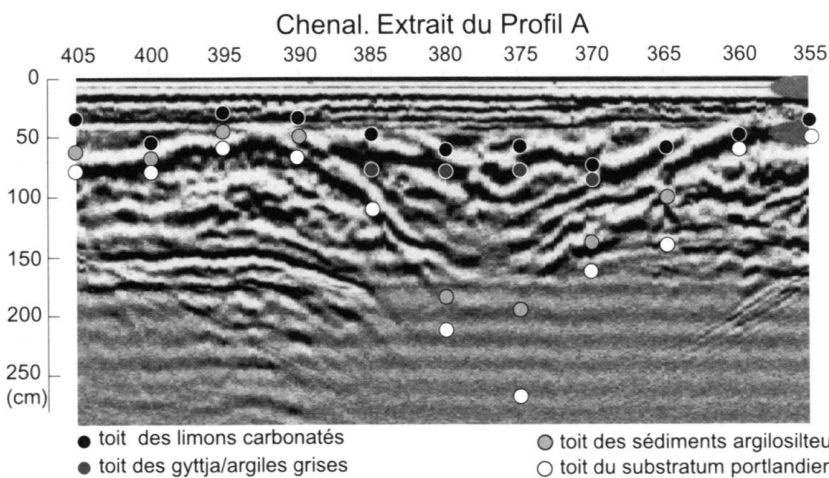
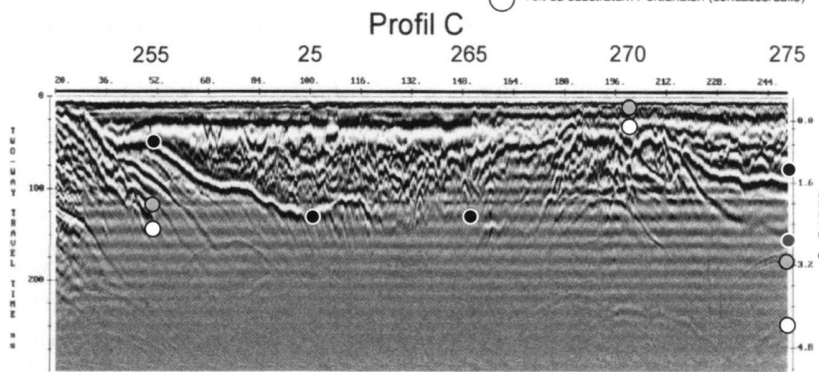


Fig. 9. Sections radar A et C, radar Pulse EKKO 100, fréquence 100MHz, pas d'échantillonnage 0,2 m, fenêtre 300 ns. La localisation des profils est sur la figure 2.

Ground Penetrating Radar (GPR) profiles A and C, frequency 100 MHz, station spacing 0.2 m, time window of 300 ns. Location of the profiles shown on figure 2.

forte et nette. La polarité de la réflexion montre une décroissance brutale de la permittivité diélectrique, indiquant probablement une moindre saturation en eau et incidemment une augmentation de la vitesse de propagation. Les sédiments argilo-silteux laminés de la base du remplissage lacustre apparaissent déposés directement sur la dalle calcaire.

Les sections A et C permettent de vérifier d'autre part que le toit du substratum calcaire présente effectivement, lorsqu'il est relativement superficiel, une topographie aussi compliquée que celle entrevue par la prospection électromagnétique EM 31 avec notamment:

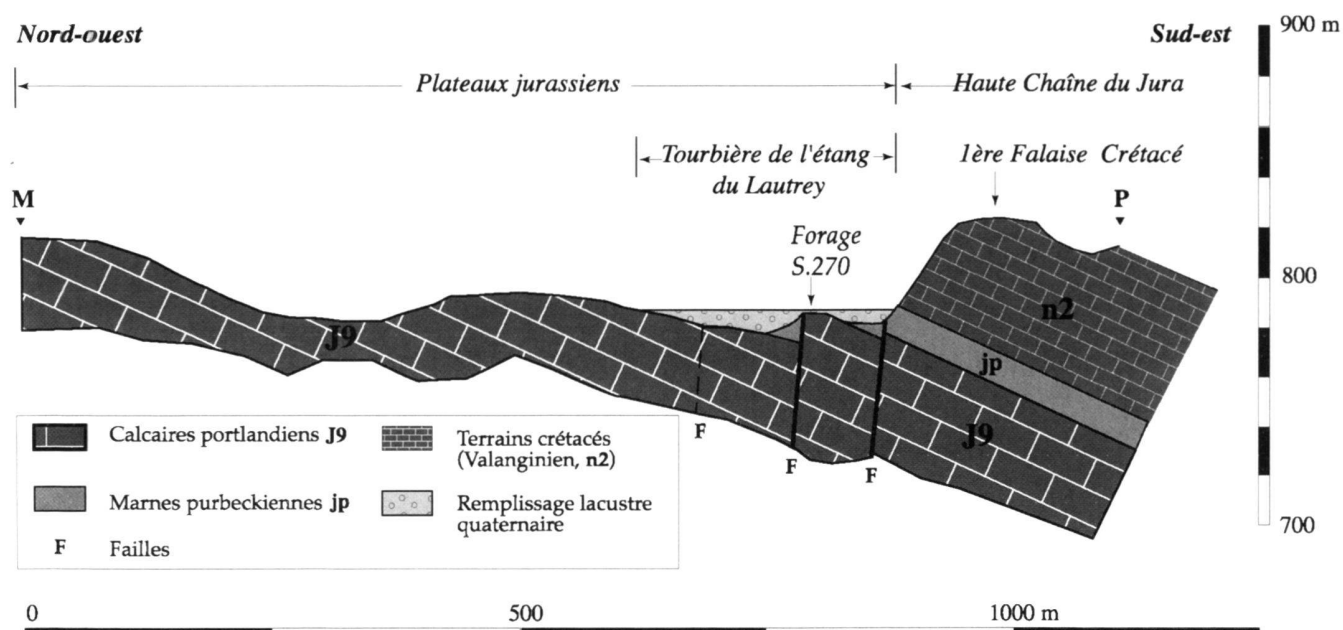


Fig. 10. Coupe géologique interprétative sur un profil transversal à la dépression du Lautrey. La localisation de la coupe MP est sur la figure 1. *Interpretative geological cross section in Le Lautrey basin. Line of section MP shown on figure 1.*

- une remontée très abrupte des calcaires au point 270 s'opérant à la faveur de l'escarpement de faille, et perceptible dans la forme sub-v verticale des réflecteurs; cette remontée est attestée par le forage mécanique réalisé au point 270 où le toit des calcaires a été rencontré à une profondeur de 0,65 m sous la surface de la tourbière
- une structure en creux de 2,60 m de profondeur et de 15 m de large, correspondant à l'incision du chenal dans le calcaire, et repérée entre les points 405 et 355
- un plongement de la surface structurale des calcaires au delà du point 305.

En dépit de leur faible profondeur de pénétration, les sections présentent, à la fréquence 100 MHz, un très fort pouvoir de résolution. Sur portion extraite de la section A, (Fig. 8) une bonne correspondance apparaît entre le pointé du réflecteur et la position en profondeur toit du calcaire reconnue par 11 forages carottés implantés tous les 5 m perpendiculairement à l'axe du chenal (Fig. 2). Ces forages confirment à nouveau que la base du remplissage lacustre repose directement sur la dalle calcaire.

IV. CONCLUSION

La reconnaissance de la morphologie de la dépression lacustre du Lautrey par les méthodes géophysiques représentait l'exploration d'une tranche du sol comprise entre 0 et 15 m de pro-

fondeur. La complémentarité, en terme de profondeur d'investigation, des méthodes géophysiques utilisées et la bonne corrélation de leurs résultats avec les données de forage permet d'obtenir une restitution précise, continue et fiable de la paléotopographie du substrat de la dépression et des variations d'épaisseur de son remplissage.

Les modélisations informatiques des pseudo-sections de résistivité et la profondeur du toit des calcaires reconnue dans les forages montrent que la structure monoclinale se poursuit sous le remplissage lacustre: la surface des calcaires du portlandien terminal y plonge selon la même pente topographique (Fig. 10). Les coupes sériées transversales et longitudinales construites à partir de données ne montrent pas de modification morphologique notable du substrat «érodé» en bassin de surcreusement; cette observation conduit à formuler l'hypothèse qu'en l'absence de surcreusement glaciaire clairement identifiable, c'est la structure tectonique du secteur qui, en favorisant des dégagements structuraux, aurait déterminé la formation de trois cuvettes à fond étanche dans la dépression (Fig. 11). En l'absence de soubassement de moraine de fond constatée par les forages, l'imperméabilité du substrat aurait été assurée par une érosion partielle des marnes purbeckiennes; cette imperméabilité aurait été prolongée ensuite par le dépôt des premières argiles laminées basales du remplissage lacustre.

Au plan méthodologique, plusieurs enseignements, peuvent être tirés de ce travail pour l'étude ultérieure des forma-

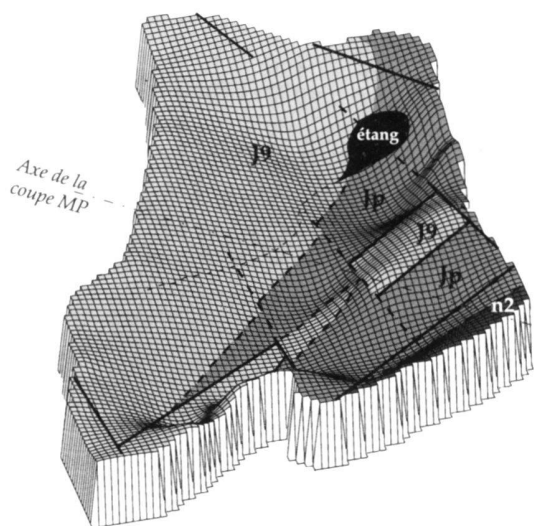


Fig. 11. Représentation modélisée 3D de la topographie anté-lacustre de la dépression du Lautrey en relation avec la nature du substrat (Jp, J9, n2).
3D modelling representation of the pre-lacustrine topography of the basin of Le Lautrey in relation to the types of bedrock (Jp, J9, n2).

tions superficielles lacustres: remplissages palustres ayant évolué en tourbières typiques et remplissages lacustres (sédiments argilo-silteux et limons carbonatés) surmontés d'un niveau tourbeux.

Le test radar du Lautrey confirme, après ceux effectués récemment sur des rives de lacs (Leckebusch 1998, Dabas et al. 1999), l'aptitude de la méthode à détecter de manière continue et non destructive, les formes sédimentaires dans les milieux lacustres. Malgré une faible profondeur de pénétration (3 m environ), plusieurs réflecteurs ont pu être corrélés à des interfaces entre faciès sédimentaires; grâce au pouvoir de résolution de la méthode, l'existence d'accidents structuraux et d'irrégularités topographiques affectant le toit du substrat calcaire a pu être confirmée.

Dans ce milieu électriquement conducteur, l'appareillage EM31 s'est révélé très bien adapté à la cartographie rapide de la conductivité sur les 10 hectares correspondant à la surface de la tourbière. Enrichie des informations quantitatives et qualitatives tirées des sondages électriques et des forages de reconnaissance, la carte de conductivité peut être retranscrite en carte d'iso-épaisseur du remplissage lacustre après avoir validé les différents ratios de conversion conductivité/épaisseur du remplissage en différents points de la zone d'étude. Dans la tranche de profondeur 0 à 6 m, la cartographie EM31 de la conductivité, réalisée sur un maillage fin compatible avec les caractéristiques géométriques des structures à étudier, délimite précisément l'extension latérale des trois cuvettes et l'emprise d'un ancien chenal conduisant à l'exutoire du lac postglaciaire.

De ce point de vue, la mise en œuvre conjointe de ces trois méthodes a parfaitement répondu aux objectifs assignés à l'étude géophysique de ce site de tourbière.

REFERENCES

- BOSSUET, G., RICHARD, H., MAGNY, M. & ROSSY, M. 1997: Nouvelle occurrence du Laacher See Tephra dans le Jura central. L'étang du Lautrey (France). *C. R. Acad. Sci. (Paris)* 325, 43–48.
- BOSSUET, G. 1997: Contribution des sondages électriques à l'étude des sites de tourbières. L'étang du Lautrey (Jura, France). *Rev. Quaternaire* 8, (4), p. 359–364.
- BUONCRISTIANI, J.-F., BICHET, V., BOSSUET, G., CAMPY, M. & DI GIOVANNI, C. 1996: Contribution des méthodes géophysiques (sismique réfraction et méthodes électriques) à l'identification des corps sédimentaires piégés dans le remplissage lacustre des Brenets (Doubs, France) depuis la dernière glaciation. *Eclogae geol. Helv.* 89.2/, 677–695.
- DABAS, M., CAMERLYNCK, C., BOSSUET, G., PETREQUIN, P. & BAILLY, M. 1999: Détection par méthode radar de niveaux anthropiques du Néolithique final sous le niveau actuel du lac de Chalain (France). *C. R. Acad. Sci. (Paris)* 328, 509–514.
- FRISCHKNECHT, F.C., LABSON, V.F., SPIES, B.R. & ANDERSON, W.L. 1991: Profiling methods using small source – In: *Electromagnetic methods in applied Geophysics*, S.E.G.M.N. Vol. 2 part A, 105–283. (Ed. by MABIGHIAN).
- JOL, H.M. & SMITH, D.G. 1991: Ground penetrating radar of northern lacustrine deltas. – *Canad. J. Earth Sci.* 28, 1939–1947.
- LECKEBUSCH, J. 1998: Georadar in Binnengewässern. In *Archäologie unter Wasser*, VML Verlag Marie Leidorf GmbH, Rahden/Westf., 81 p.
- LOKE, M.H. & BAKER, R.D. 1996: Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudo-sections by a quasi-Newton method. *Geophysical prospecting*, 44, 131–152.
- MC NEILL, J.D. 1980: Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers: Mississauga, Ontario, Canada, Geonics Ltd., Technical Note TN-6, 15 p.
- MEHENI, Y., BENDERITTER, Y., GUERIN, R. & TABBAGH, A. 1996: Comparaison de méthodes pour la cartographie détaillée de la résistivité électrique du sous-sol dans la gamme 2–20 mètres. *Géologues*, n° 109, 25–36.
- NOBES D.C. & WARNER, B.G. 1992: Application of Ground-Penetrating Radar to a study of peat stratigraphy: preliminary results. in *Ground Penetrating Radar*, ed. J. Pilon; Geol. Survey Canada, Paper 90-4, p. 133–138.
- RICHARD, H. 1983: Nouvelles contributions à l'histoire de la végétation franco-comtoise tardiglaciaire et holocène à partir des données de la palynologie. – Thèse de l'Université de Franche-Comté, 155 p. et diagrammes.
- ROBERTS, M.C., BRAVARD, J.P. & JOL, H.M. 1997: Radar signatures and structure of an avulsed channel: Rhône River, Aoste, France. *J. Quaternary Sci.* 12(1), 35–42.
- RUFFALDI, P. 1995: La fin du Pléniglaciaire dans le Jura méridional à partir des analyses palynologiques du lac de Cerin (Ain, France). *C. R. Acad. Sci. (Paris)* 320, IIa, 1117–1123.
- THEIMER, B.D., NOBES, D.C. & WARNER, B.G. 1994: A study of the geoelectrical properties of peatlands and their influence on ground-penetrating radar surveying. *Geophysical prospecting* 42, 179–209.
- ULRIKSEN, P. 1982: Application of impulse radar to civil engineering. Doctoral Thesis. Dept of engineering geology, Lund University of Technology, Sweden. 175 p.
- WEGMÜLLER, S. 1966: Über die Spät und postglaziale Vegetationsgeschichte des südwestlichen Jura. *Beitr Geobot. Landesaufn.* 48, 142 p.

Manuscrit reçu le 11 octobre 1999

Révision acceptée le 26 mai 2000