Contribution des méthodes géophysiques (sismique réfraction et éléctrique), à l'identification des corps sédimentaires piégés dans le remplissage lacustre des Brenets (Doubs, France) depuis la dernière glaciation

Autor(en): **Bouncristiani, Jean-François / Bichet, Vincent / Bossuet, Gilles**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Eclogae Geologicae Helvetiae**

Band (Jahr): **89 (1996)**

Heft 2

PDF erstellt am: **28.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-167920

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Eclogae geol. Helv. 89/2: 677–694 (1996)

0012-9402/96/020677-18 $1.50 + 0.20/0
Birkhäuser Verlag, Basel

Contribution des méthodes géophysiques (sismique réfraction et électrique), à l'identification des corps sédimentaires piégés dans le remplissage lacustre des Brenets (Doubs, France) depuis la dernière glaciation

JEAN-FRANÇOIS BUONCRISTIANI[1], VINCENT BICHET[1], GILLES BOSSUET[2], MICHEL CAMPY[1] & CHRISTIAN DI GIOVANNI[3]

Key words: Quaternary, lacustrine infilling, seismic refraction, electrical surveying
Mots clés: Quaternaire, remplissage lacustre, sismique réfraction, méthode électrique

ABSTRACT

The sedimentary infilling of Brenets paleolake is studied to characterize and quantify changes in material flows since the last glaciation. The lithology and geometry of the various sedimentary units are mapped from 35 boreholes. These spot observations are supplemented by geophysical exploration including seismic refraction and electrical sounding.
From the combined results, substrate morphology (limestone, marl-limestone or moraine) can be recognized and at least two major entities may be characterized in the infilling: one composed of sandy gravels and sandy clays (Gs/As) deposited between 12,500 and 9,000 B.P. and a second one of clayey silts and lacustrine chalk (Sa/Cl) laid down between 9,000 B.P. and the present day. The combination of these two geophysical techniques provides a quick and reliable survey of substrate topography and of the two entities forming the infilling, facilitating subsequent quantitative analysis.

RESUME

Le remplissage sédimentaire du paléolac des Brenets est étudié afin de qualifier et de quantifier l'évolution des flux de matière depuis la dernière glaciation. La nature lithologique et la géométrie des différentes unités sédimentaires ont été reconnues par 35 forages mécaniques. Ces observations ponctuelles sont complétées par une exploration géophysique mettant en œuvre la sismique réfraction et les méthodes électriques (sondages).
A partir de l'interprétation conjointe des résultats, il est possible de reconnaître la morphologie du substrat (calcaires, marno-calcaire ou morainique) et de caractériser au moins deux grands ensembles dans le remplissage: un premier ensemble constitué de graviers sableux et d'argiles sableuses (Gs/As) déposés entre 12500 B.P. et 9000 B.P., et un deuxième ensemble constitué de silts argileux et des craies lacustres (Sa/Cl) déposés entre 9000 B.P. et aujourd'hui. En couplant ces deux méthodes géophysiques, il apparaît donc q'une étude rapide et fiable de la topographie du substrat et des deux ensembles constituant le remplissage peut être envisagée, facilitant ultérieurement l'analyse quantitative du remplissage.

[1] Centre des sciences de la terre, UMR CNRS 5561, 6 Bd Gabriel, F–21000 Dijon
[2] Laboratoire de Chrono-Écologie, UPR 7557 du CNRS, 16 Route de Gray, F–25030 Besançon Cedex
[3] Laboratoire de géologie des systèmes sédimentaires, Faculté des sciences et technique, Parc Grandmont, F–37200 Tours

1. Introduction

L'étude des flux sédimentaires actuels, issus de l'érosion continentale et exportés par les écoulements superficiels, est abordée par l'analyse du fonctionnement de petits bassins versants expérimentaux (Hornung et al. 1990) et par la mesure des flux, particulaires et en solution, à l'embouchure des fleuves (Milliman & Meade 1983; Meybeck 1984). Les résultats obtenus donnent une bonne idée, qualitative et quantitative, des exportations actuelles ou très récentes (au mieux sur les 10 dernières années). Mais il est difficile d'extrapoler ces données aux périodes plus anciennes durant lesquelles les variations climatiques, entre autres, ont influencé les types d'érosion et de ce fait la nature et la quantité des produits exportés. Le milieu lacustre constitue un piège sédimentaire efficace des flux anciens (graviers, sables, silts et argiles) dont il garde la mémoire (Berglund 1990; Pourriot & Meybeck 1995). La nature et la quantité des matériaux piégés dans un lac dépendent de la production de matière issue de l'érosion de son bassin versant et transitant par les écoulements superficiels. De ce fait, les flux sédimentaires anciens sont étudiés en analysant les matériaux piégés par un géosystème lacustre (Svendsen et al. 1989; Campy et al. 1994; Macaire et al. 1995).

Généralement, la reconnaissance des unités constituant le remplissage et son substrat, est réalisée par forages mécaniques (carottier ou tarière). Ce mode d'exploration reste ponctuel, il permet une bonne reconnaissance des faciès, mais reste très limité pour définir la géométrie des corps sédimentaires et la paléotopographie du substrat. Aussi pour l'étude des formations superficielles, les méthodes géophysiques: la sismique réfraction (Meyer 1984; Coulom 1986; Long et al. 1992); la méthode électrique en courant continu (Claudon 1977; Bordonau 1992; Bossuet & al. 1993); la méthode electromagnétique (Palacky & Stephens 1990) et la sismique réflexion (Pugin & Rossetti 1992; Elverhoi 1995) sont souvent utilisées afin d'obtenir une géométrie continue des différents ensembles qu'elles permettent d'individualiser. Sur chaque site étudié, la méthode géophysique doit être applicable au problème local. La densité des points de mesure doit toujours rester suffisante pour décrire avec précision les variations de la variable physique sur tout l'espace prospecté.

En prenant comme exemple un remplissage lacustre jurassien: le lac des Brenets (appelé aussi lac de Chaillexon sur sa rive française), nous proposons d'abord de définir sur ce site les ensembles sédimentaires caractérisés par deux méthodes géophysiques (la sismique réfraction et la méthode électrique); puis d'apprécier l'apport de chacune de ces méthodes et leur complémentarité pour la reconnaissance de la géométrie des corps sédimentaires et du substrat.

2. L'exemple du remplissage lacustre des Brenets

Le lac des Brenets est situé dans le Haut-Jura à la frontière Suisse (Fig. 1). Au Tardiglaciaire, un éboulement rocheux a barré le cours du Doubs permettant ainsi la formation d'un lac à l'amont de ce barrage (Schardt 1902). Une reconnaissance du remplissage lacustre par 35 forages majeurs (Fig. 2) répartis dans la totalité de la plaine alluviale a permis de montrer qu'il s'étendait sur une quinzaine de kilomètres à l'amont du lac actuel, et représentait le comblement progressif du lac par les apports du Doubs (Campy et al. 1985). Actuellement, le remplissage sédimentaire occupe un peu plus des 9/10èmes de

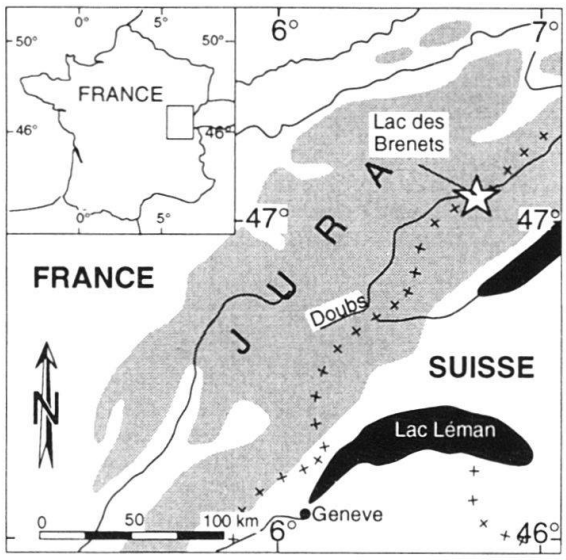


Fig. 1. Localisation de la zone d'étude: le lac des Brenets (Haut-Jura).

Fig. 1. Study area location: Brenets lake (High Jura mountains).

la vacuité initialement disponible. Le substrat du remplissage lacustre est constitué par tous les dépôts antérieurs à la mise en place du barrage naturel sur le Doubs, il s'agit principalement des formations crétacées (calcaires et marno-calcaires néocomiens, marnes albiennes) et des dépots glaciaires ou proglaciaires (moraines würmiennes). La morphologie permet de différencier deux zones dans le remplissage: la zone amont et la zone aval.

2.1 Nature et géométrie du remplissage

Les forages mécaniques permettent une bonne identification des faciès traversés (Fig. 2). De l'examen et l'analyse des carottes, quatre types d'unités faciologiques pour l'ensemble du remplissage sont déterminées, ainsi qu'une reconstitution de la géométrie des différentes unités (Campy et al. 1994, fig. 3).

Unité 1: Graviers grossiers à matrice sableuse (Gs)

Elle est présente dans la zone amont (transects A-B, C-D, E-F, Fig. 3 et forage «camping», Fig. 2) où elle correspond à l'essentiel du remplissage, puis son épaisseur décroît progressivement vers l'aval. Cette unité est constituée de graviers (3 à 8 cm de diamètre) à matrice sableuse, avec présence locale de gros blocs (15 à 20 cm). Les éléments grossiers sont arrondis et faiblement émoussés. Ils sont composés de calcaires qui correspondent à des faciès du Jurassique supérieur, du Crétacé ou aux couvertures glaciaires et fluvio-glaciaires du bassin versant. Les structures sédimentaires de cette unité n'ont pas pu être observées, mais dans ce secteur du Jura, ce type de dépôt correspond souvent à des cônes fluviatiles ou des deltas de bordure lacustre en position proximale (Campy 1982).

Unité 2: Argiles grises à passées sableuses (As)

Dans la zone amont, elle recouvre l'unité 1 (transects A-B, C-D, E-F, Fig. 3 et forage «camping», Fig. 2), puis est reconnue à la base de tous les forages du remplissage qui atteignent le substrat (par exemple dans les forages «Moulin-Bournez» et «Pré-Mouret», Fig. 2). On constate ainsi une diminution de son épaisseur de l'amont vers l'aval, où cette unité représente l'équivalent distale de l'unité 1 (Gs). Elle est composée d'argiles grises compactes, à niveaux sableux métriques de distribution irrégulière, qui présentent soit une structure homogène dans leur couleur et leur granulométrie, soit une structure de type laminé avec alternance de faciès gris clair et plus foncé.

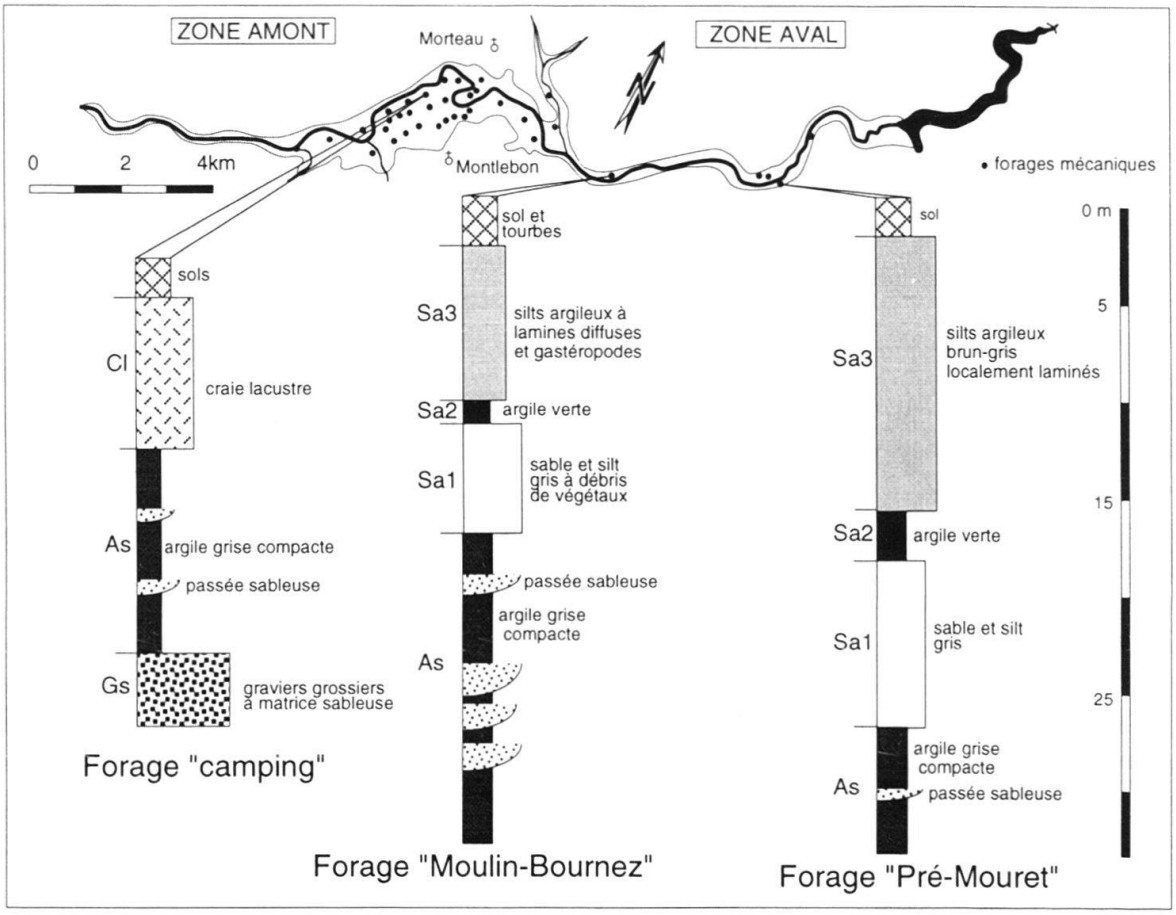


Fig. 2. Morphologie du site étudié et présentation de 3 forages mécaniques répartis de l'amont à l'aval du remplissage lacustre qui permettent d'individualiser quatre unités faciologiques principales (Gs, As, Cl, Sa; décrite dans le texte, paragraphe 2.1).

Fig. 2. Morphology of the study site and presentation of 3 bore-holes distrubuted over the upstream and the downstream part of the lacustrine in filling, used to individualise the four principal units (Gs, As, Cl, Sa; described in the text, section 2.1).

Unité 3: Silts Argileux (Sa)

Cette unité apparaît à partir du transect C-D (Fig. 3) sur 6 à 7 m de puissance dans la partie supérieure du remplissage, puis elle s'épaissit progressivement jusqu'au transect le plus aval K-L (Fig. 3) où elle atteint une trentaine de mètres. Localement laminée, cette unité est composée de silts argileux riches en débris de coquilles de gastéropodes, elle présente de nombreux sous faciès distincts par leur couleur et leur contenu:
- Faciès de couleur grise à passée sableuse et débris de végétaux (Sa1), à forte teneur en carbonate
- Faciès silteux de couleur gris-vert (Sa2), sur une puissance de quelques mètres, composés de silts à 60%/70%
- Faciès à lamines diffuses de couleur brun-gris (Sa3).

Unité 4: Craie lacustre (Cl)

On ne la trouve que dans la zone amont du remplissage. Elle se présente sous forme de banquette latérale (beine) de part et autre du chenal occupé par le complexe argilo-silteux. Il s'agit d'une micrite calcaire riche en débris d'organismes (coquilles de gastéropodes, tiges et oogones de Characées), qui s'accumulent de manière progradante depuis les berges en direction du centre du lac (Campy & Richard 1987). Ce dépôt est de type

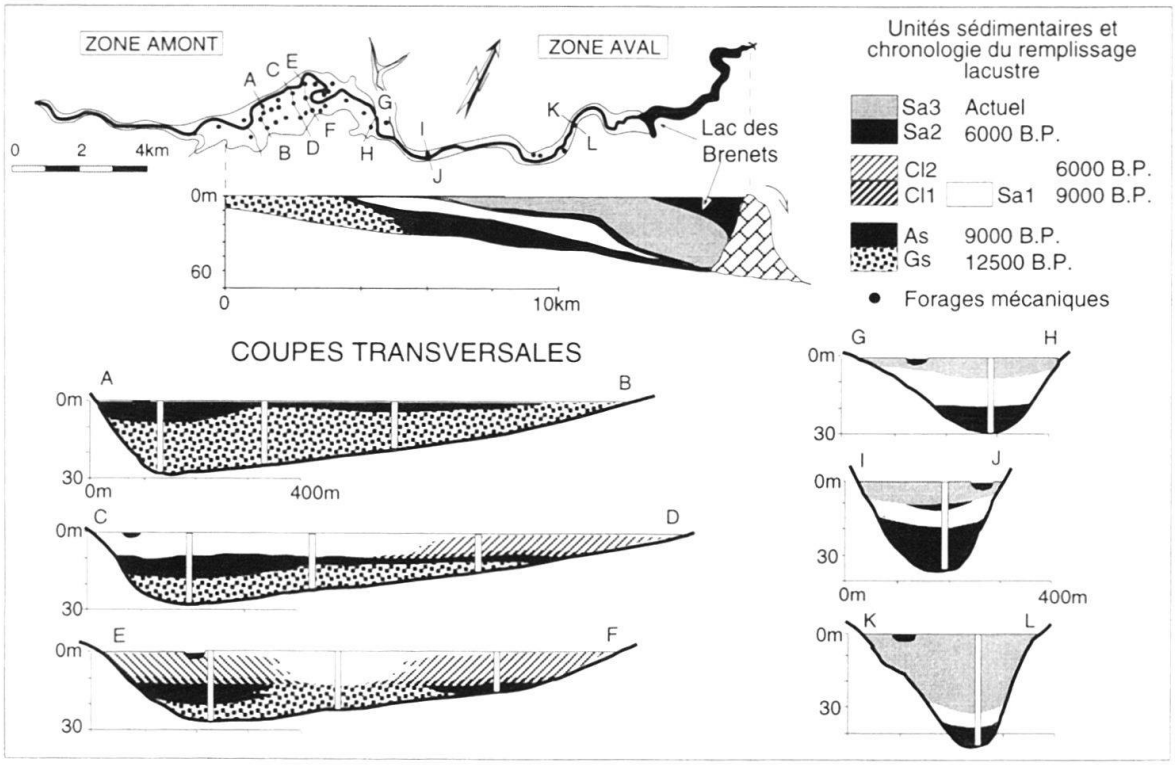


Fig. 3. Coupe longitudinale et transects dans le remplissage lacustre, réalisés à partir des forages mécaniques (d'après Campy et al. 1994).

Fig. 3. Longitudinal section and transects in the lacustrine infilling (after Campy et al. 1994).

séquentiel, débutant à la base par une micrite calcaréo-argileuse souvent laminée et se terminant par des faciès pisolitiques alguaires (Platt & Wright 1991). On distingue deux sous faciès:

- Faciès calcaréo-argileux à la base (Cl1), laminé, avec une alternance de lits gris argileux et de lits clairs de type craie lacustre
- Faciès craie lacustre typique (Cl2).

Les sédiments fins sont analysés (Di Giovanni 1994) à partir d'échantillons issus du forage de Moulin-Bournez (Fig. 2). Du point de vue granulométrique (Fig. 4), les faciès du remplissage fin (unité 2, As et unité 3, Sa) présentent les caractères de sables silto-argileux, de silts argilo-sableux ou d'argiles silteuses. L'unité 2 (As) est composée de 60% de silts et de 40% d'argiles au sens granulométrique (fraction inférieure à 50 µm), elle est entrecoupée de niveaux sableux où la fraction supérieure à 50 µm atteint ou dépasse 50%. Dans l'unité 3, le faciès Sa1 présente le même type de granulométrie que l'unité 2 avec cependant une plus faible teneur en argile; les unités Sa2 et Sa3 sont caractérisées par une plus grande régularité granulométrique avec une prédominance de silts (60 à 70%) et un faible pourcentage de fraction supérieure à 50 µm. L'étude des densités apparentes (poids sec/volume avant séchage) effectuée sur une trentaine d'échantillons permet de conclure à une apparente homogénéïté (Fig. 4) entre les unités 3 (Sa) et 4 (CI) dont la densité moyenne est de $0{,}9 \cdot 10^3 Kg/m^3$. Par contre, la densité moyenne de l'unité 2 (As) équivalente à $1{,}4 \cdot 10^3 Kg/m^3$, est plus forte.

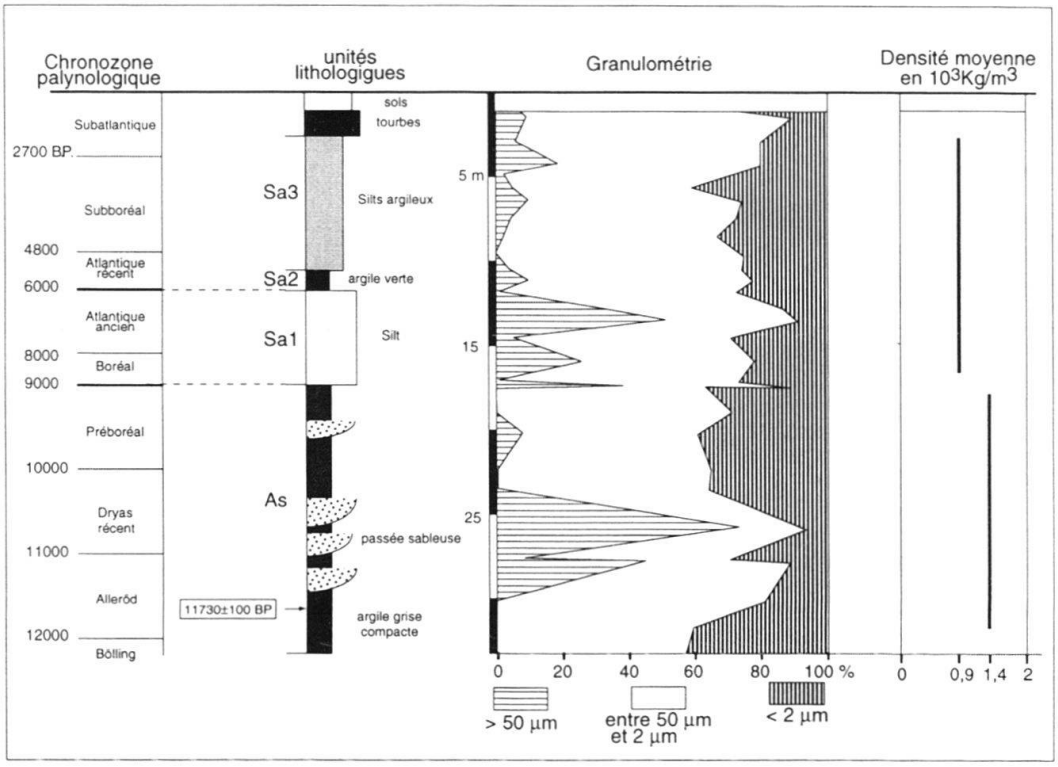


Fig. 4. Analyse sédimentologique et chronologie de mise en place des principales unité du forage «Mouli-Bournez» (d'après Di Giovanni 1994).

Fig. 4. Sedimentological analysis and chronology of principal units from «Moulin-Bournez» bore-hole (after Di Giovanni 1994).

2.2 Contexte hydrogéologique

L'hétérogénéité sédimentologique du remplissage lacustre induit une dynamique hydrogéologique caractérisée par une partition entre le secteur proximal de la zone amont d'une part, la partie distale de la zone amont et la zone aval, d'autre part. Les unités 2, 3 et 4 (argiles grises As, complexe argilo-silteux Sa, craies lacustres Cl), qui constituent l'intégralité du remplissage de la zone aval et une bonne part de la zone amont, présentent, dans l'ensemble, une très faible perméabilité (à l'exception de quelques passées sableuses des dépôts As ou Sa1). Cet ensemble semi-perméable contient une nappe libre de faible capacité, qui selon les conditions hydrologiques est drainée ou alimentée en partie, par le Doubs, dont les méandres parcourent la vallée.

Dans le secteur proximal de la zone amont, le fonctionnement hydrogéologique est plus complexe, assimilable à un aquifère à nappe semi-captive. Les faciès semi-perméables des unités 3 et 4 coiffent les dépôts grossiers de l'unité 1 (Gs). Les sables et graviers du delta proximal constituent un aquifère productif (Transmissivité = $7 \cdot 10^{-3}$ Fm^2/s; Coefficient d'emmagasinement = $2{,}6 \cdot 10^{-6}$), exploité en plusieurs puits par les communes riveraines. Le débit artésien de certains forages de reconnaissance et les paramètres hydrodyna-

miques de cette nappe en conditions de pompage (Diren 1971), traduisent le régime captif de l'aquifère limité aux faciès grossiers du delta amont.

2.3 Chronologie du remplissage

La chronologie du remplissage est établie à l'aide de son contenu palynologique (exemple du forages Moulin-Bournez, Fig. 4) dont l'évolution est bien connu dans ce secteur du jura (Richard 1983; Ruffaldi 1993), et complétée par 17 datations ^{14}C. Ces données ont permis de dater les périodes de mise en place des différents faciès (Campy et al. 1994):

Dépôt des argiles sableuses (As) et par conséquent des graviers sableux (Gs): Bölling-Préboréal (12500-9000 ans B.P.)
Dépôt des silts argileux à passées grossières (Sa1) et des craies lacustres (Cl): Préboréal-Atlantique ancien (9000-6000 B.P.)
Dépôt des silts argileux supérieurs (Sa2 et Sa3): Atlantique ancien – Subatlantique (6000 B.P.-actuel).

3. Application de la méthode sismique réfraction

3.1 Méthode et mise en œuvre

Cette méthode consiste à mesurer la vitesse de propagation des ondes dans les différentes couches du sous-sol. Pour sa mise en œuvre, les vitesses doivent être contrastées d'une unité à l'autre et les couches successives doivent présenter des vitesses croissantes. Si ce principe n'est plus applicable, il devient impossible de déterminer l'épaisseur et la vitesse de cette couche. La sismique réfraction est dite «aveugle» pour des couches de moindre vitesse (Lavergne 1986).

L'étude sismique mise en œuvre sur la zone amont du remplissage consiste en 21 profils (Fig. 5) d'une longueur de 120 m (l'Offset et l'espacement entre les géophones est de 5 mètres) et un long profil (6 profils de 120 m, coupe AA' Fig. 5) recoupant transversalement la dépression. Dans la zone aval 2 profils de 300 mètres (l'offset et l'espacement entre les géophones est de 12,5 mètres) sont réalisés. Les mesures sont effectuées avec l'appareil: ABEM TERRALOC MARK 3 SYSTEM (sismographe à 24 canaux). Les sources d'ondes utilisées sont: le marteau, dont la faible intensité des signaux reçus aux derniers géophones est compensée par une réception cumulée des chocs; et un explosif brisant (tytadine 25). On réalise pour chaque profil un tir direct et inverse. Nous prenons lors de l'interprétation de ces profils, l'hypothèse de modèles planaires (horizontaux ou inclinés). La détermination des vitesses, des épaisseurs et des pendages des terrains géophysiques s'est faite grâce à un programme de calcul utilisant les équations d'Adachi (1954).

3.2 Étalonnage des unités du substratum et du remplissage

Les différentes formations du substrat sont étalonnées sur affleurement à proximité immédiate du remplissage lacustre (Buoncristiani 1994). Les moraines présentent des va-

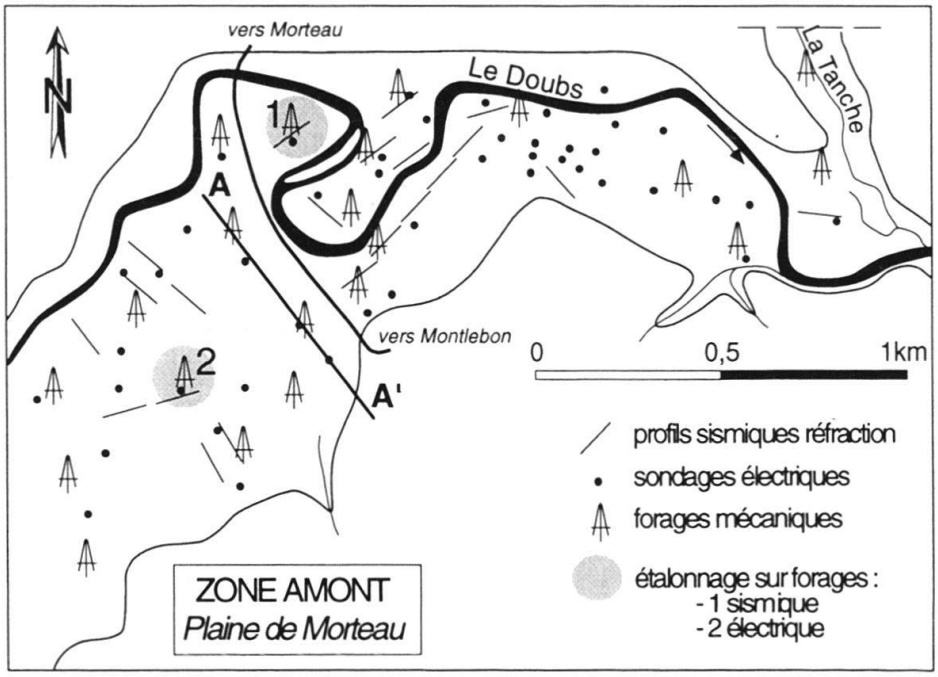


Fig. 5. Localisation des profils sismiques, des sondages électriques et des forages mécaniques dans la partie amont du remplissage (la plaine de Morteau). Le long profil géophysique (coupe AA') est situé à l'amont de la route reliant Montlebon à Morteau.

Fig. 5. Location of seismic profiles, electrical soundings and bore-holes in the upstream part of the infilling (Morteau plain). The long geophysical (section AA') profile is situated ahead of the road from Montlebon to Morteau.

leurs voisine de 1700 ms^{-1}, les marnes albiennes 2500 ms^{-1} et les vitesses du calcaire néocomien sont supérieures à 2900 ms^{-1}. Ces résultats montrent que dans la zone amont, les différents faciès du substratum couvrent une large gamme de vitesses s'échelonnant de 1700 ms^{-1} à 3700 ms^{-1}.

La succession des unités dans le remplissage est déterminée grâce aux forages mécaniques, elle correspond à 2 unités en superposition (bicouches), ou 3 unités en superposition (tricouches). L'implantation des profils sismiques au droit des forages (Fig. 6) permet d'établir une corrélation entre les «terrains géophysiques» et les faciès géologiques, ce qui permet de définir une gamme de vitesses pour les différentes unités du remplissage. A partir de ces données nous comparons les différentes unités afin d'individualiser les ensembles mis en évidence par la sismique réfraction.

Cependant, afin d'effectuer la comparaison entre les différentes unités du remplissage, il est nécessaire de préciser le contexte hydrologique et son influence sur l'état de saturation des unités du remplissage lacustre car la vitesse d'une formation varie en fonction de son état de saturation (Telford et al. 1984). Les forages réalisés dans le remplissage (Fig. 3) montrent que le complexe argilo-silteux (Sa) et les craies lacustres (C1) sont toujours en position sommitale. Le niveau de la nappe libre dans ces formations (réglé par le régime hydrologique du Doubs) est reconnue dans tous les forages entre 5 m et

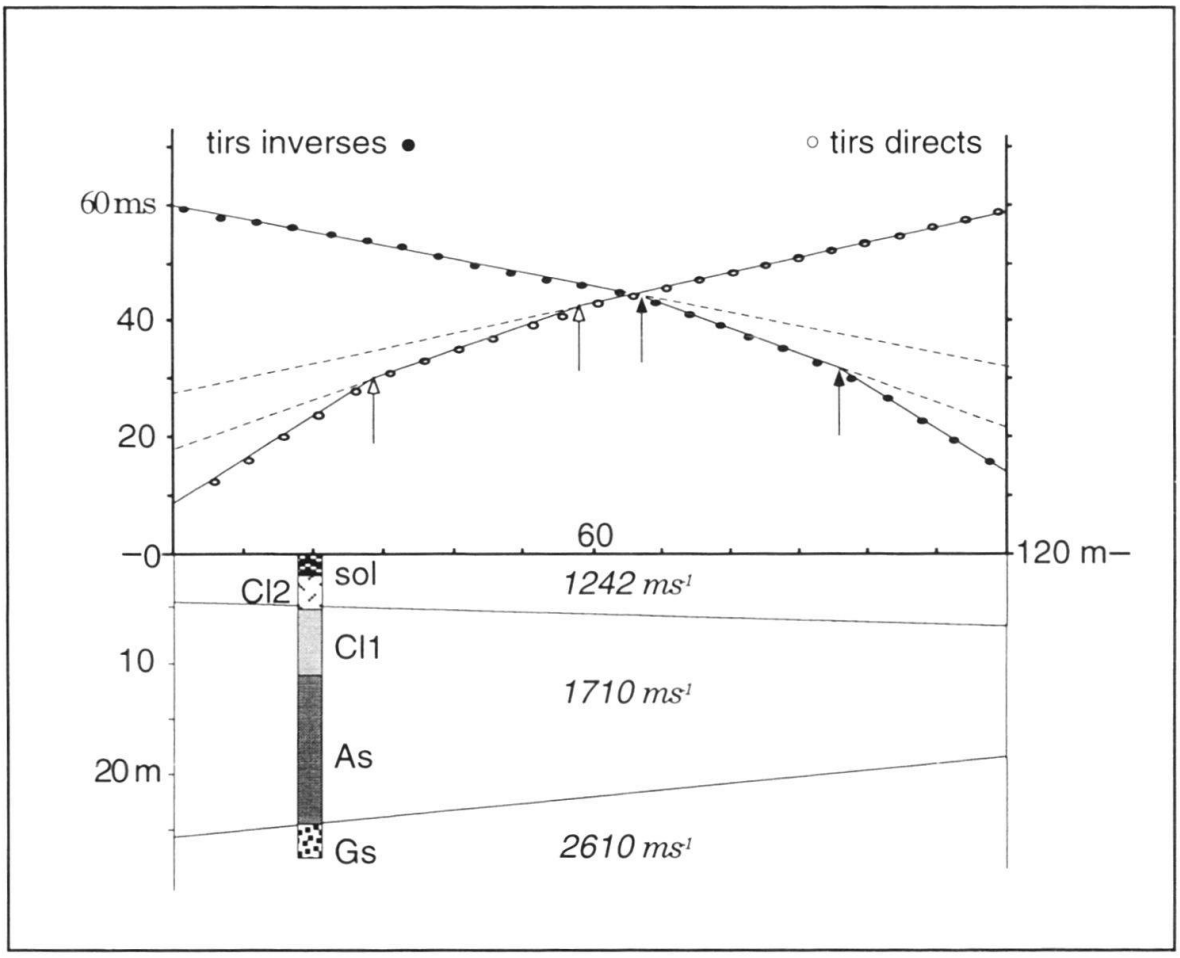


Fig. 6. Exemple d'étalonnage des unités du remplissage par la sismique réfraction, en comparant les données d'un forage mécanique et le modèle géophysique calculé à partir des tirs sismiques directs et inverses.

Fig. 6. Example of calibration of infilling units by seismic refraction, comparing data from a core and the geophysical model computed from direct and reverse seismic shots.

7 m. Sur l'ensemble de la zone étudiée, les vitesses mesurées pour ces deux unités correspondent donc à celle du premier terrain géophysique et représentent des vitesses de formation non saturées. D'après les forages (Fig. 3), le deuxième terrain géophysique est représenté par les argiles sableuses As ou par les graviers sableux Gs. Au regard des conditions hydrogéologiques, ces deux unités sont toujours faiblement saturées (argiles sableuses) ou totalement saturées (graviers sableux). Les vitesses mesurées pour ces deux unités correspondent à des vitesses de formation totalement ou faiblement saturées.

Ainsi, la connaissance de la géométrie des unités dans le remplissage et du contexte hydrogéologique, permet de comparer les différentes unités mises en évidence par la sismique, en s'affranchissant de l'influence de la saturation en eau des différentes formations.

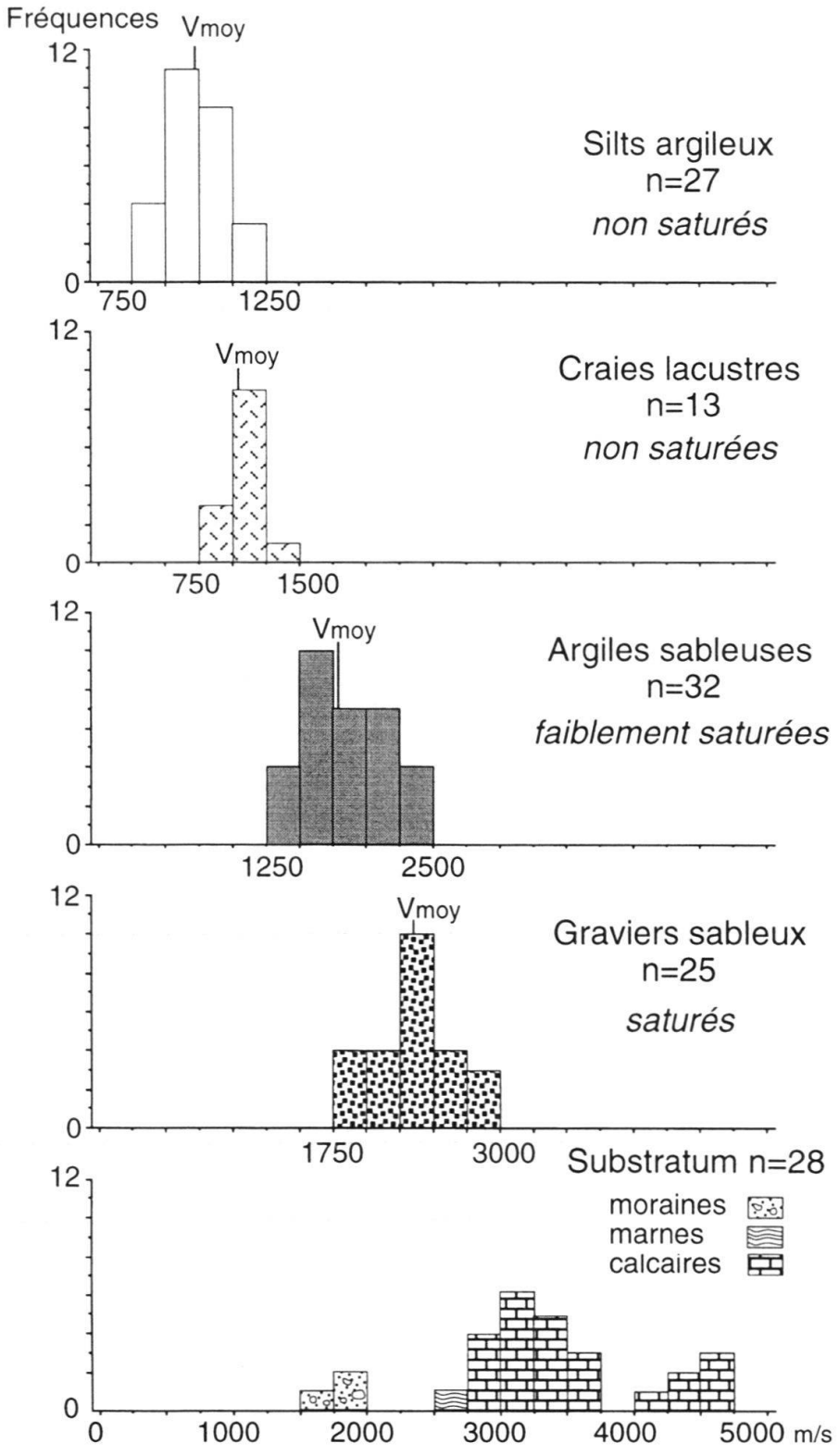


Fig. 7. Histogramme de fréquences des vitesses pour les unités du remplissage et du substrat (la longueur de classe est de 250 ms^{-1} et n représente le nombre de valeurs utilisées).

Fig. 7. Histogram of seismic velocity frequencies for infilling units and substrate (class length is 250 ms^{-1} where n is the number of values used).

3.3 Résultats

La vitesse d'une formation géologique varie en fonction de ses caractéristiques sédimentologiques, tectoniques et géotechniques. Dans la zone étudiée, afin de tenir compte de ces variations, une approche statistique de la distribution des vitesses est faite pour exprimer la variabilité caractéristique au sein de chaque unité. Les vitesses mesurées sont représentées par des histogrammes de fréquences (Coulom 1986), avec des bornes de classes identiques pour chaque faciès. Les histogrammes donnent les fréquences d'apparition en fonction des vitesses, rangées en classes de 250 ms^{-1}, soit une longueur de classe qui représente un intervalle d'échantillonnage de vitesses relativement fin (Fig. 7).

Les ensembles mis en évidence par la sismique réfraction sont déterminés par la comparaison des histogrammes de fréquence:

- Pour le substrat, l'histogramme présente une distribution plurimodale; un fort contraste existe entre les vitesses du substratum le plus rapide (calcaires néocomiens) et celui des unités du remplissage (Sa, Cl, As, Gs), son individualisation par la sismique réfraction est donc possible. En revanche, les substrats morainiques et marneux présentent des vitesses plus faibles (1800 à 2500 ms^{-1}) ou comparables à celles des unités du remplissage sus-jacentes (As et Gs), il y a dans ce cas inversion de vitesse et passage en «couche aveugle» pour la sismique réfraction, des substrats morainiques et marneux.
- La distribution des vitesses des silts argileux (750 à 1250 ms^{-1}) se différencie bien de celles des argiles sableuses (1250 à 2500 ms^{-1}) et de celles des graviers sableux (1750 à 3000 ms^{-1}). Les bicouches Sa/As et Sa/Gs seront facilement mises en évidence par la sismique réfraction.
- La répartition de la vitesse des craies lacustres (750 à 1500 ms^{-1}) est presque identique à celle des silts argileux (750 à 1250 ms^{-1}), la différenciation entre ces deux unités ne sera donc pas possible par la sismique réfraction. Néanmoins, les forages montrent que les craies lacustres reposent exclusivement sur les As dont les vitesses sont différentes; si la présence de craie est reconnue par forages superficiels, la bicouche Cl/As deviendra discernable en sismique réfraction.
- les vitesses des argiles sableuses (1250 à 2500 ms^{-1}) et des graviers sableux (1750 à 3000 ms^{-1}) présentent un recouvrement, ce qui rend implicitement très difficile la distinction entre ces unités. Cependant, comme les vitesses élevées des argiles sableuses (supérieures à 1800 ms^{-1}) se rencontrent préférentiellement dans les profils exécutés en aval de la route Montlebon/Morteau (Fig. 5); il sera alors possible, en amont de cette route, de différencier par la sismique réfraction la bicouche Sa/Gs et les tricouches Cl/As/Gs et Sa/As/Gs. Par contre, la présence de graviers sableux en aval de cette route ne pourra pas être précisée par cette méthode.

La sismique réfraction permet donc de distinguer de façon précise les trois ensembles suivant: l'ensemble argiles sableuses et graviers sableux (Gs+As), l'ensemble silt argileux et craie lacustre (Sa+Cl) ainsi que le substrat calcaire.

4. Application de la méthode électrique

4.1 Méthode

La prospection électrique consiste à mesurer la résistivité du sous-sol. Cette méthode électrique est mise en œuvre suivant le principe du sondage électrique, dispositif Schlumberger. Le sondage électrique consiste à injecter un courant dans le sol entre deux électrodes et à recueillir aux bornes de deux autres prises de terre la tension créée par ce courant en circulant dans le terrain (Astier 1971). Le dispositif est quadripolaire et sa profondeur est proportionnelle à ses dimensions en surface (cette profondeur d'investigation est estimée empiriquement au 1/4 de la longueur séparant les électrodes de reception pour les petites lignes et tend vers le 1/10 cette longueur pour les grandes lignes). L'interprétation directe des sondages électriques, la détermination des épaisseurs et des résistivités vraies des terrains géophysiques, sont faites à partir d'un logiciel d'interprétation automatique (IGA Sondel 1991) à deux niveaux de précision, méthode de Gosh (filtre à 9 coefficients) et méthode de Johansen (filtre à 140 coefficients).

4.2 Etalonnage des unités du substratum et du remplissage

Deux sondages sont réalisés sur les formations glaciaires würmiennes en position sub-affleurante, leur interprétation permet de définir les résistivités vraies de cette formation, comprises entre 40 et 140 Ωm. Une campagne de 46 sondages électriques implantés dans la zone amont du remplissage (Fig. 5) dont la longueur maximun du dispositif d'injection choisi varie entre 200 et 300 mètres a été réalisée (Remy 1989; Buoncristiani 1994).

L'interprétation des courbes de sondages électriques peut conduire à plusieurs modèles, car il n'existe pas de solution unique pour déterminer les épaisseurs et les résistivités vraies, plusieurs résultats étant possibles (Astier 1971). Pour choisir, des sondages électriques sont effectués à l'emplacement des forages mécaniques, permettant la comparaison entre les unités lothologiques décrites en forages et les diagrammes des courbes de sondages électriques (Fig. 8); nous obtenons ainsi les résistivités vraies des unités du remplissage et du substratum calcaire ou marneux (l'étalonnage du substrat morainique étant effectué à l'affleurement).

4.3 Résultats

A l'aide de la calibration obtenue grâce aux forages, des transects et des modèles électriques, chaque unité du remplissage et du substrat est caractérisée par un ensemble de valeurs de résistivités. Il est alors possible d'établir les plages de variation de résistivité pour chaque unité du remplissage et du substrat (Fig. 9), afin de déduire les relations entre les faciès électriques et les faciès sédimentaires.

- Le substratum du remplissage lacustre est caractérisé par trois plages distinctes de variation de résistivité: les moraines (40 à 140 Ωm), le substrat marneux (12 à 30 Ωm) et le substrat calcaire (100 à 450 Ωm). Les fortes variations de résistivités enregistrées pour les calcaires sont dues à l'hétérogénéite de leur faciès et de leur fracturation.
- Le remplissage grossier (graviers sableux, Gs) constitue une couche géoélectrique ré-

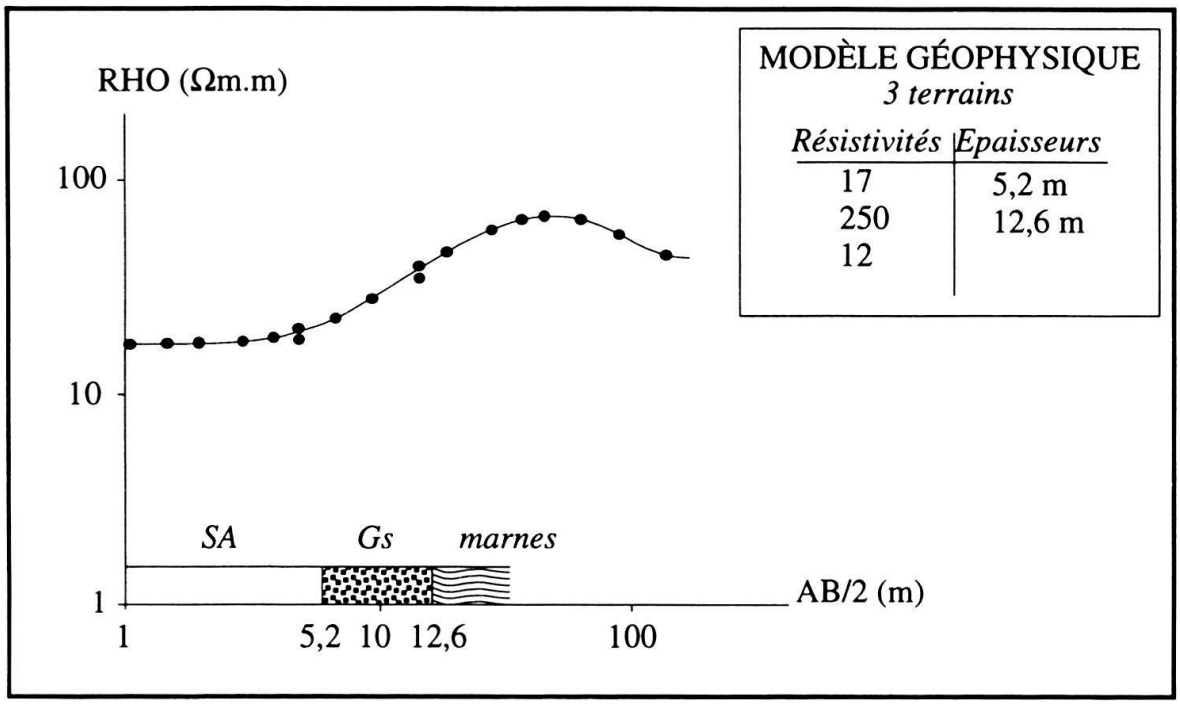


Fig. 8. Comparaisons entre la courbe de sondage électrique, le forage mécanique correspondant au sondage électrique et le modèle géophysique.

Fig. 8. Comparison of the electrical sounding, the core used for the electrical sounding and the geophysical model.

sistante (170 à 250 Ωm). Cette couche peut être détectée lorsqu'elle repose sur le substratum marneux qui est électriquement conducteur.

- L'ensemble des unités: silts argileux (Sa), craie lacustre (Cl) et argiles sableuses (As), constitue une seule couche géoélectrique conductrice. Ces unités ne peuvent être mises en évidence que si elles reposent sur une couche résistante. Ainsi, elles ne peuvent être individualisées que si elles reposent sur les graviers sableux, le substrat calcaire ou morainique. A l'inverse, elles ne peuvent pas être distinguées quand elles sont superposées au substrat marneux.

Les sondages électriques permettent donc de fixer la profondeur: du substrat (calcaire, marneux ou morainique), du remplissage grossier (Gs) si il repose sur des marnes, et de l'ensemble du remplissage fin (Sa+Cl+AS).

5. Comparaison entre la sismique réfraction et la méthode électrique

Le but des méthodes géophysiques est de mettre en évidence le contraste entre les paramètres physiques des unités sédimentaires (vitesses de propagation des ondes, résistivités électriques) qui ont dans chaque cas des causes particulières (Meyer de Stadelhofen 1991). En sismique les variations enregistrées dans les vitesses de propagation dépendent des propriétés mécaniques des matériaux, de l'altération, de la compaction; et en résisti-

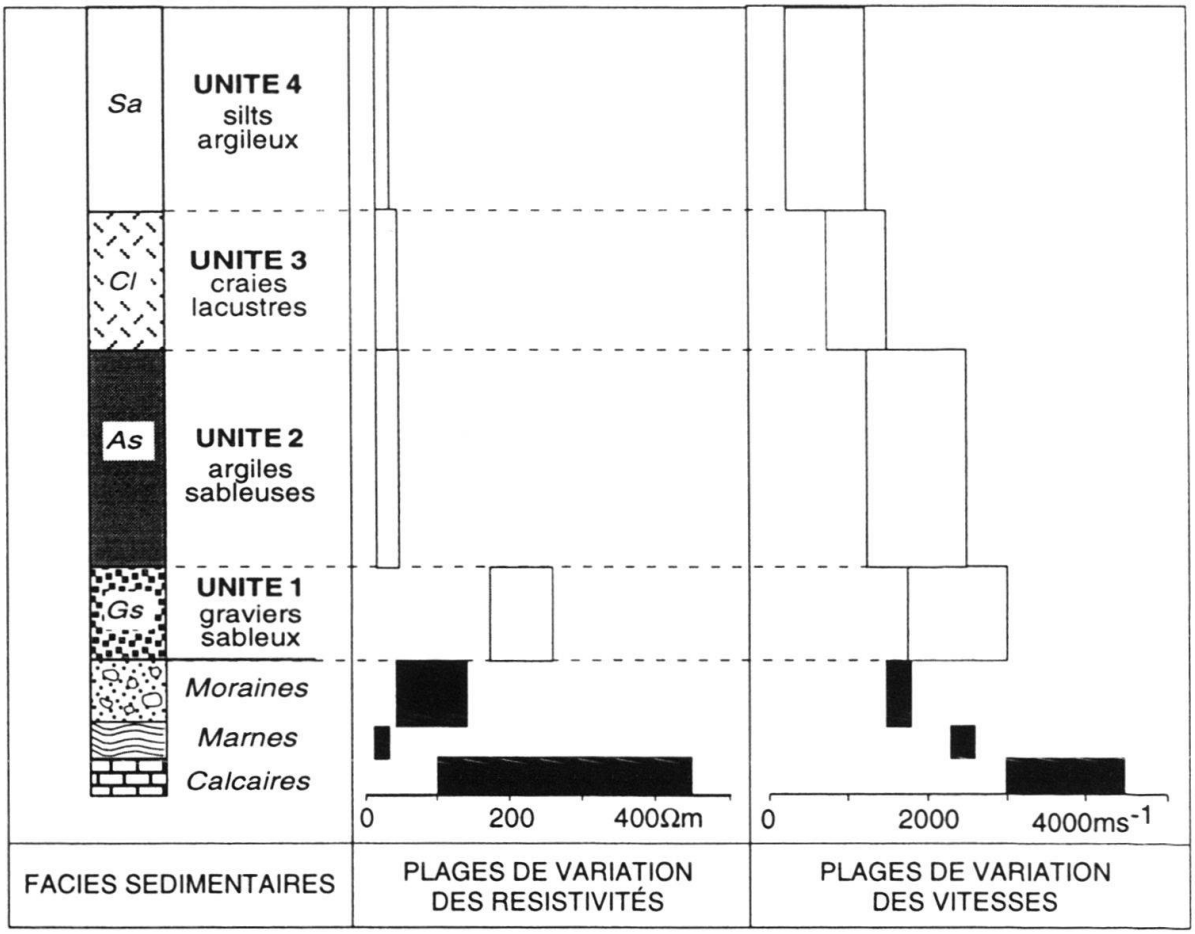


Fig. 9. Log lithologique simplifié (sans échelle). Comparaison entre les plages de variation de la résistivité et les plages de variation des vitesses.

Fig. 9. Simplified lithological log (not to scale). Range of resistivity variation versus range of speed variation.

vimétrie, les variations de résistivité sont fonction de la teneur en eau, de la charge ionique, de la conductivité des particules et de leur géométrie. Les unités individualisées par ces deux méthodes géophysiques peuvent être identiques ou différentes, dans les deux cas la comparaison est nécessaire. Pour cela, les étalonnages réalisés pour les deux méthodes géophysiques sont représentés par la plage de variation de chacun des paramètres physiques étudiés (Fig. 9).

Dans le premier cas, lors de l'identification d'un même marqueur par les deux méthodes, les connaissances sur l'interface sont améliorées en mettant en relation les données fournies par les deux méthodes. Par exemple, les calcaires néocomiens sont à la fois mis en évidence par méthode sismique (vitesse rapide) et par méthode électrique (couche résistante bien individualisée). Dans le deuxième cas, chaque méthode va définir des interfaces différentes, ce qui augmente la précision dans la connaissance du terrain; en électrique la couche conductrice supérieure correspond à l'ensemble Sa/Cl/As alors que la sismique permet de distinguer l'ensemble Sa/Cl des As. Les graviers sableux (unité résis-

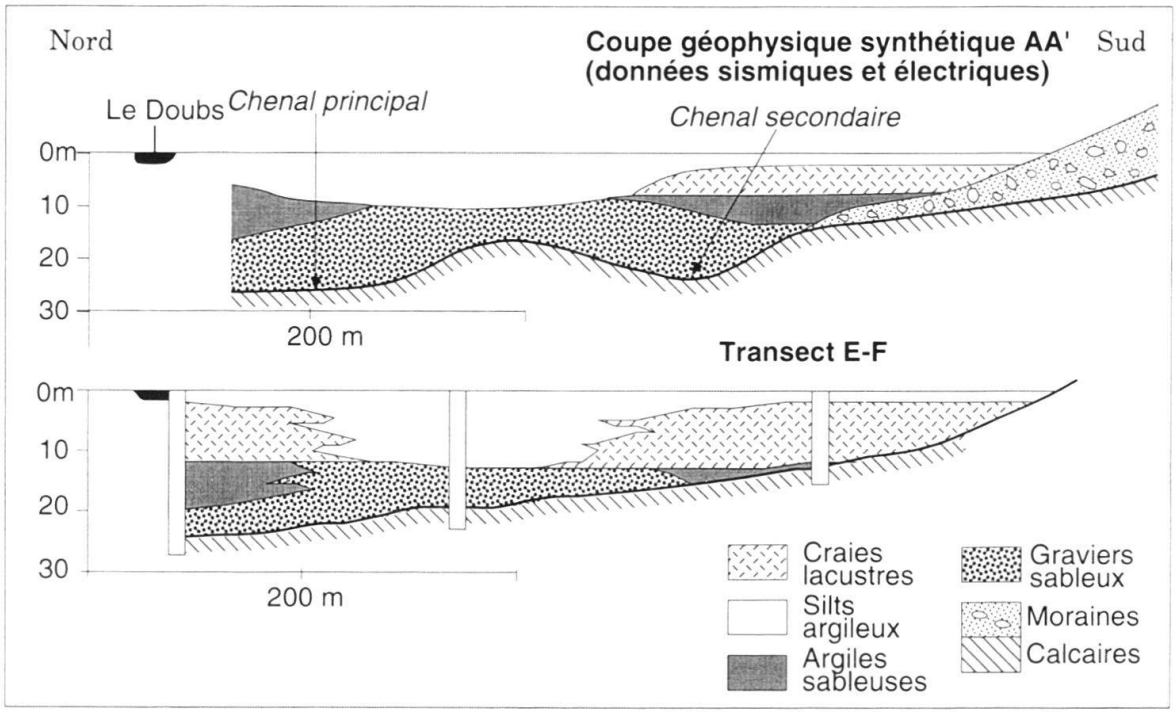


Fig. 10. Comparaison entre un profil géophysique (coupe AA') construit à partir des données sismiques et électriques et le transect E-F construit à partir des données de 3 forages mécaniques.

Fig. 10. Comparison between a geophysical profile (section AA') constructed from seismic and electrical data and E-F transect based on data from 3 bore-holes.

tante) seront mieux individualisés en sismique par leur vitesse que dans les sondages électriques où faute d'un contraste suffisant entre leur propriétés électriques, ils seront impossible à distinguer. Le substratum marneux correspond à une couche conductrice alors que sa faible vitesse le fait passer en couche aveugle.

Ces deux méthodes apparaissent donc très complémentaires pour une meilleure identification des unités sédimentaires du remplissage lacustre et de la morphologie de son substrat.

6. Apports de la géophysique à la géométrie des unités sédimentaires

L'organisation et la géométrie des unités sédimentaires mises en évidence par les méthodes géophysiques peuvent être définies dans le remplissage lacustre, ainsi que la forme et la nature du substrat, ce qui permet de réaliser leur couverture en continu. Cette démarche est appliquée à une partie de la zone amont du remplissage, où une coupe géophysique synthétique est réalisée (coupe AA', Fig. 5).

Cette coupe géophysique synthétique représente l'interprétation des résultats issus des méthodes électriques et sismique réfraction. Elle permet donc de suivre en continu les différentes unités individualisées par ces deux techniques dans cette zone et de dessiner de façon plus précise la géométrie des corps sédimentaires et du substrat. Elle peut

être comparée au transect construit à partir des données issues de trois forages mécaniques (Campy et al. 1994) où la continuité entre les différentes unités reste interprétative (Fig. 10).

- D'après l'interprétation des sondages sismiques et électriques, nous mettons en évidence le substrat calcaire et morainique, ce qui permet de préciser sa profondeur. Du nord au sud il apparaît deux dépressions dans un substrat calcaire: la dépression nord pouvant correspondre à l'ancien cours du Doubs (chenal majeur) et celle se trouvant au sud à l'un de ses affluents (chenal secondaire).
- Les graviers sableux et les argiles sableuses sont bien individualisés par la sismique dans cette zone du remplissage, ceci permet de dessiner la géométrie de ces deux unités. Il apparaît ainsi un chenal à faible tendance érosive au toit de cet ensemble. Ces deux unités marquent la fin du Préboréal; or, cette époque est marquée par une baisse du niveau lacustre de 9 m (Di Giovanni 1994). Ce chenal peut être lié à l'assèchement transitoire du lac à cet endroit et à l'installation d'un système fluviatile érosif.
- La sismique atteste aussi la présence de craie lacustre au sud de la coupe et par conséquent définie sa géométrie. Mais la craie lacustre reconnue par forage au nord de la coupe n'est pas retrouvée en géophysique. Ceci serait peut-être dû à une faible épaisseur de cette unité à l'endroit où est réalisé le profil sismique, ou à une augmentation progressive des vitesses.

7. Conclusion

A partir des forages mécaniques implantés à la surface du site, l'étalonnage par deux méthodes géophysiques des unités du remplissage a pu être réalisé, ce qui témoigne de la complémentarité entre ces deux types d'approche de la nature du remplissage. Nous avons montré que les méthodes géophysiques utilisées permettent de définir de façon précise la nature et la géométrie du substrat, l'ensemble déposé entre 12500 B.P. et 9000 B.P (Graviers sableux/Argiles sableuses) et l'ensemble déposé entre 9000 B.P. et aujourd'hui (Stilts argileux/Craies lacustres). Cependant, le degré de précision dans la reconnaissance des unités sédimentaires par ces deux méthodes géophysiques est directement lié à l'existence d'un contraste entre les propriétés physiques des matériaux. Ceci entraîne l'impossibilité de réaliser une corrélation entre certaines unités sédimentaires et leurs faciès géophysiques (vitesses comparables des silts argileux et des craies lacustres; résistivités identiques des silts argileux, des craies lacustres et des argiles sableuses).

Une poursuite de ces travaux sur ce sujet est envisagée de la façon suivante: effectuer une couverture géophysique de tout le remplissage lacustre, afin d'une part, de déterminer la morphologie et la nature du substrat et d'autre part, de calculer les volumes de sédiment correspondant aux deux phases de mise en place des dépôts reconnues par la géophysique. Ceci permettra de calculer un taux d'érosion du bassin versant pour chaque phase et de caractériser l'évolution de la capacité de piégeage du géosystème.

Remerciements

Les recherches ont bénéficié du soutien financier du programm DBT (thème 1: «Fleuves et Erosion») et de l'UMR 5561 du CNRS (Paléontologie analytique et Dynamique sédimentaire, thème 2: «Fonctionnement des géosystèmes continentaux»). Les auteurs tiennent à remercier A. Dupis (C. R. Garchy) et A. Festeau (C.S.T.) pour leur aide lors des campagnes géophysiques, ainsi que M^{r} Baltenberger (C. R. Garchy) pour ses conseils lors des interprétations et des calculs pour la méthode sismique réfraction.

BIBLIOGRAPHIE

ADACHI, R. 1954: On a proof of fundamental formula concerning refraction method of geophysical prospecting. Kumamoto J. Sciences 2, 18.

ASTIER, J. L. 1971: Geophysique appliquée à l'hydrogéologie. Masson, Paris.

BERGLUND, B. E. 1990: Handbook of holocene palaeoecology and palaeohydrology. J. Wiley & Sons, New York.

BORDONAU, J. 1992: Els complexos glacio-lacustres relacionats ams el darrer cicls glacial als Pirineus. Thèse, Université de Barcelonne. Géoforma ediciones, Logroño.

BOSSUET, G., RUFFALDI, P., MARTIN, J. & CHOQUIER, A. 1993: Reconnaissance du contexte géologique et de la nature du remplissage d'un bassin lacustre du Jura méridional. Le lac de Cerin (Ain, France). Eclogae geol. Helv. 86, 355–376.

BUONCRISTIANI, J. F. 1994: Relation entre facies sédimentaires et facies géophysiques, application au remplissage lacustre de Chaillexon (Doubs, France). Mémoire de DEA, Université de Bourgogne.

CAMPY, M. 1982: Le Quaternaire franc-comtois: essai chronologique et paléoclimatique. Thèse, Université de Franche-Comté.

CAMPY, M. & RICHARD H. 1987: Dynamique et typologie des remplissage tardi- et postglaciaire de la chaîne jurassienne. Document du CERCLAT, Mém. 1, 165–180.

CAMPY, M., HEIM, J. & RICHARD, H. 1985: Dynamique du comblement et contexte climatique du remplissage tardi- et postglaciaire du lac de Chaillexon (Doubs, France). Ecologia Mediterranea XI/1, 135–146.

CAMPY, M., BICHET, V., DI-GIOVANNI, CH., RICHARD, J., RICHARD, H. & OLIVE, P. 1994: Evolution des flux de matière depuis 12 000 ans dans la haute vallée du Doubs (France). Bull. Soc. Géol. France 165, 383–402.

CLAUDON, G. 1977: Etude hydrogéologique de la plaine de Pontarlier. Thèse de docteur ingénieur, Université de Franche-Conté.

COULOM, M. 1986: Contribution de la sismique réfraction à la connaissance de la zone d'altération de la craie et de ses formations superficielles. Bull. inf. géol. bass. Paris 2, 149–162.

DI GIOVANNI, CH. 1994: Production, flux et stocks de matière organique dans un système limnologique au cours du postglaciaire: le bassin de Chaillexon (Doubs, France). Thèse, Université de Bourgogne.

ELVERHOI, A., SVENDSEN, J. I., SOLHEIM, A. ANDERSEN, E. S., MILLIMAN, J., MANGERUD, J. & HOOKE, R. L. 1995: Late Quaternary sediment yield from the Artic Svalbard area J. Geol. 103, 1–17.

DIREN, 1971: Direction Régionale de l'Environnement, Alimentation en eau du Syndicat du Russey. Rapport inédit.

HORNUNG, M., RODA, F. & LANGAN, S. J. 1990: A review of small catchment studies in western Europe. Producing hydrochemical budgets, Air Pollution Research, Report n° 17, Comm. European Communities.

IGA-SONDEL, 1991: Logiciel d'interprétation de sondages électriques Schlumberger, Version 2.02. Société IGA, Tours.

LAVERGNE, M. 1986: Méthodes sismiques. Technip, Paris.

LONG, A. J., GUNN, C. A., N. R. & BEDLINGTON, D. J. 1992: Mapping the pre-Holocene surface of an infilled valley in the East Kent Fens, UK, with a shear-wave seismic refraction. The Holocene 2, 57–62.

MACAIRE, J. J., BOSSUET, G., CHOQUIER, A., COCIRTA, C., DE LUCA, P., DUPIS, A., GAY, I., MATHEY, E. & GUENET, P. 1995: Impact climatique et anthropique sur l'érosion mécanique en montagne cristalline de région tempérée pendant le tardiglaciaire et l'holocène. Analyse du bassin du lac de Chanbom (Puy-de-Dôme, France). C.R. Acad. Sci. 320, série IIa/7, 579–585.

MEYBECK, M. 1984: Les fleuves et le cycle géochimique des sédiments. Thèse Université de Paris VI.

MEYER, M. 1984: Application de la sismique réfraction à la prospection des sols et des formations superficielles. Thèse de docteur ingénieur, ENSA Montpellier.

MEYER DE STADELHOFEN, C. 1991: Application de la géophysique à la recherche d'eau. Tec & Lavoisier, Paris.

MILLIMAN, J. D. & MEADE, R. H. 1983: World-delivery of river sediment to the oceans. J. Geol. 91, 1–21.

PALACKY, G. J. & STEPHENS, L. E. 1990: Mapping the Quaternary sediments in northeastern Ontario using ground electromagnetic methods. Geophysics 55, 1596–1604.

PLATT, N. H. & WRIGHT, V. P. 1991: Lacustrine carbonate: facies model, facies distribution and hydrocarbon aspects. Spec. Publ. Int. Sediment 13, 57–74.

POURRIOT, R. & MEYBECK, M. 1995: Limnologie générale. Masson, Paris.

PUGIN, A. & ROSSETTI, S. 1992: Acquisition of land based high resolution seismic profiles in glacial basins, two case studies in the Alpine foreland of Switzerland. Eclogae geol. Helv. 85, 491–502.

REMY, J. M. 1989: Les transferts particulaires (flux, stock et bilans) dans un système continental: le bassin de Chaillexon (Doubs-france). Mémoire de DEA, Université de Bourgogne.

RICHARD, H. 1983: Nouvelles contributions à l'histoire de la végétation franc-contoise tardiglaciaire et holocène, à partir des données de la palynologie. Thèse, Université de Franche-Conté.

RUFFALDI, P. 1993: Histoire de la végétation du Jura méridional depuis le retrait des glaciers würmiens à partir des analyses palynologiques du lac de Cerin (Ain, France). Thèse, Université de Franche-Conté.

SCHARDT, H. 1902: Note sur l'origine du lac des Brenets. Bull. Soc. Neuch. sci. naturelles 30, 312–313.

SVENDSEN, J. I., MANGERUD, J. & MILLER, G. H. 1989: Denudation rates in the Artic estimated from lake sediment on Spitserg, Svalbard. Paleogeol. paleoclimatol. paleoecol. 76, 153–168.

TELFORD, W. M., GELDART, L. P., SHERIFF, R. E. & KEYS, D. A. 1984: Prospection géophysique, tome 1, prospection sismique. E.R.G, Maurecourt.

Manuscrit reçu le 12 juin 1995
Révision acceptée le 3 février 1996