

Sensibilité de la sédimentation organique aux variations climatiques du Tardi-Wuerm et de l'Holocène; le lac du Bouchet (Haute-Loire, France)

Elisabeth Lallier-Vergès, Abdel Sifeddine, Jacques-Louis de Beaulieu, Maurice Reille, Nicolas Tribovillard, Philippe Bertrand, Thierry Mongenot, Nicolas Thouveny, Jean-Robert Disnar, Bernard Guillet

▶ **To cite this version:**

Elisabeth Lallier-Vergès, Abdel Sifeddine, Jacques-Louis de Beaulieu, Maurice Reille, Nicolas Tribovillard, et al.. Sensibilité de la sédimentation organique aux variations climatiques du Tardi-Wuerm et de l'Holocène; le lac du Bouchet (Haute-Loire, France). Bulletin de la Société Géologique de France, 1993, 164 (5), pp.661-673. hal-00122515

HAL Id: hal-00122515
https://insu.hal.science/hal-00122515

Submitted on 3 Jan 2007

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.

Bull. Soc. géol. France, 1993, t. 164, n° 5, pp. 661-673

IRD B TPB 44/1.

Sensibilité de la sédimentation organique aux variations climatiques du Tardi-Würm et de l'Holocène; le lac du Bouchet (Haute-Loire, France)[1]

par ELISABETH LALLIER-VERGÈS*, ABDELFATAH SIFEDDINE*, JACQUES LOUIS de BEAULIEU**, MAURICE REILLE**, NICOLAS TRIBOVILLARD***, PHILIPPE BERTRAND*, THIERRY MONGENOT*, NICOLAS THOUVENY****, JEAN-ROBERT DISNAR* et BERNARD GUILLET*

Mots clés. – Lac de maar, Lac du Bouchet, Sédimentation organo-minérale, Palynofaciès, Palynologie, Tardi-Würm, Holocène.

Résumé. – Deux carottes de sédiments superficiels (2 à 3 m) prélevées dans le lac du Bouchet (Haute-Loire, France) ont été étudiées du point de vue de leur composition minérale et organique. Les corrélations établies à partir des données concernant la matière organique ainsi que celles de la palynologie, ont permis de replacer les deux premiers mètres de la série sédimentaire dans la logique climato-stratigraphique du passage Tardi-Würm – Holocène. Nous montrons ici que des variations climatiques de faible amplitude comme celles de l'Holocène, engendrent des changements importants dans la nature, la quantité et le mode de préservation des constituants organiques sédimentés.

The lacustrine organic sedimentation as a response to the late Würmian and Holocene climatic variations; lac du Bouchet (Haute-Loire, France)

Key words. – Maars lake, Lac du Bouchet, Organic sedimentation, Lacustrine sediments, Late Würm, Holocene.

Abstract. – The nature of Holocene and late Würmian sediments sampled in lac du Bouchet (Haute-Loire, France) has been studied through the analysis of mineral and organic fractions. An attempt to correlate the organic composition of the sediments and the climatostratigraphic scale has been performed on two cores, about 2-3 m long. Results indicate that each climatic variation of the Holocene period is recorded in the lacustrine organic sedimentation, characterized by specific amount, nature and preservation state of organic components. Tardi-Würm sediments are mostly composed of silty volcaniclastic sediments with a very poor and badly preserved organic matter, mostly characterized by oxidized land-derived debris. The warming up is expressed by an increase in organic matter. It mainly consists of well preserved ligno-cellulosic debris and pollens associated with greyish fine amorphous organic matter. The warmest episodes of Holocene (Atlantic and Sub-Boreal) are marked by the highest contents of total organic carbon (25-30 %) and hydrogen indices (up to 800 mg HC/g Corg), as well as the occurrence of reddish amorphous organic matter which is derived from pedogenetic degradation of ligno-cellulosic debris. Sub-Atlantic sediments are composed of both well-preserved ligno-cellulosic debris and greyish amorphous aggregates. They also contain pedogenetic organic matter and traces of anthropic activity.

I. – INTRODUCTION

Etant donné la nature de son environnement géologique (lac de maar), la relative stabilité de son niveau d'eau et son taux de sédimentation peu élevé (de 0,1 à 0,25 mm/an), le lac du Bouchet (Massif central, Velay, France) représente un cas exceptionnel de sédimentation quasi-continue depuis environ 0,35 Ma. Les sédiments ont enregistré les variations climatiques ayant affecté l'Europe au cours des dernières glaciations [Bonifay *et al.*, 1987]. Environ 55 mètres de sédiments ont été carottés par le groupe de travail du programme EUROMAARS qui en réalise l'étude climato-stratigraphique. L'objet de notre recherche porte plus particulièrement sur l'étude des modalités de préservation des matières organiques et des associations organo-minérales, en relation avec les phénomènes de diagenèse précoce. Dans des études sédimentologiques antérieures [Bonifay et Truze, 1987; Truze, 1990], l'Holocène du lac du Bouchet était considéré comme un sédiment organique homogène. Notre attention s'est focalisée sur le sommet de la colonne sédimentaire pour préciser les caractéristiques de la sédimentation organique au cours des 15 000 dernières années (Tardi-Würm – Holocène). Le présent travail fait état de résultats obtenus tant sur le sédiment total que sur la matière organique isolée.

II. – ÉCHANTILLONS ET TECHNIQUES ANALYTIQUES

Deux carottes voisines : LDB H (carottier à piston hydraulique mis en œuvre au cours du forage) et LDB X (carottier pneumatique : Mackereth) ont été prélevées au centre du lac au cours d'une campagne de prélèvement effectuée en septembre 1990 (fig. 1). Les échantillons ont été prélevés sur les 2,80 m supérieurs de la série sédimentaire du lac du Bouchet (tous les 2 cm pour la LDB H, tous les 5 cm pour la LDB X). Le matériel a été conservé à 4°C depuis son prélèvement dans le lac jusqu'à son étude au labora-

* Lab. Géologie de la matière organique, URA 724 du CNRS, Univ. Orléans, 45067 Orléans cedex, France.
** Lab. Botanique Historique et Palynologie, URA 1152 du CNRS, Univ. Aix Marseille, 13397 Marseille cedex 13.
*** Lab. Géochimie des roches sédimentaires, URA 723 du CNRS, Univ. Paris Sud, 91405 Orsay cedex, France.
**** Lab. Géologie du Quaternaire, UPR 1201 du CNRS, Luminy Case 907, 13288 Marseille cedex 9, France.

1. Travail réalisé dans le cadre du Groupement de Recherche « relations et processus organo-minéraux en environnements sédimentaires » (GdR 942 du CNRS), en collaboration avec le programme EUROMAARS de la Communauté Economique Européenne.
Manuscrit déposé le 10 février 1992; accepté le 1er avril 1993.

Fonds Documentaire IRD
010022542
Fonds Documentaire IRD
Cote : B* 22542 Ex: 1

toire. Les sections de carottes concernées ont été ouvertes, décrites et échantillonnées sur la base des données antérieures obtenues par le laboratoire de Géologie du Quaternaire, à Marseille [Truze, 1990]. Les échantillons destinés à la géochimie organique ont été lyophilisés.

Parallèlement, un sol sous épicea a été prélevé sur le bassin versant du lac pour en étudier sa composition en vue d'une comparaison entre ses constituants organiques pétrographiques et ceux des sédiments.

Différentes études ont été entreprises : susceptibilité magnétique, lithologie (frottis de sédiment humide monté entre lame et lamelle avec du baume du Canada), minéralogie (diffraction RX, spectrométrie IR), géochimie minérale (analyse des éléments majeurs par spectrométrie EDS), pyrolyse Rock Eval (teneur en carbone organique total ou % COT, indice d'hydrogène ou IH en mg HC/g Corg.), palynofaciès (étude optique de la matière organique isolée après attaque HF, HCl du sédiment) et palynologie.

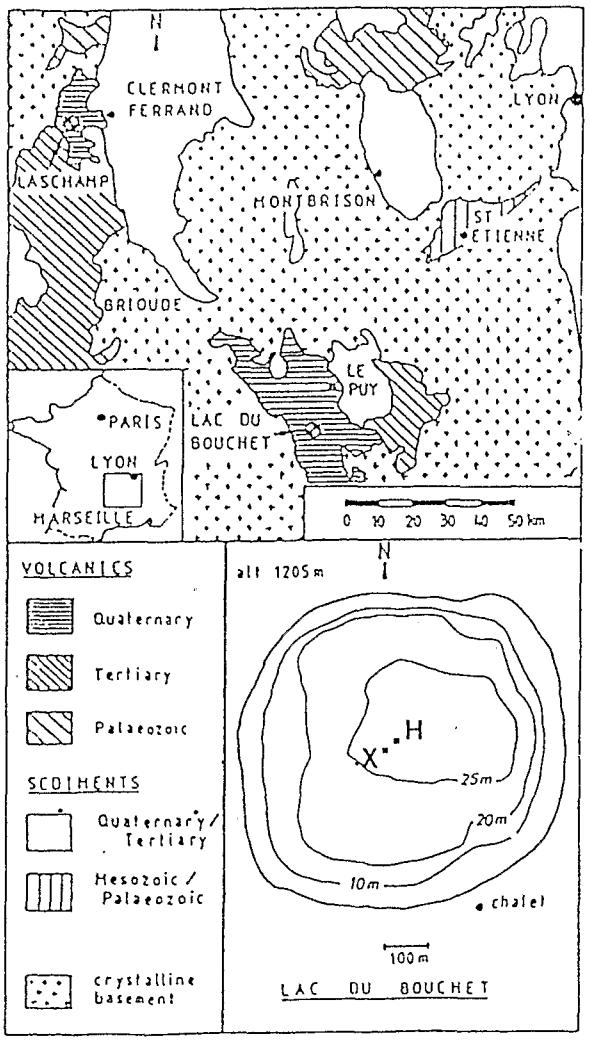


FIG. 1. – Carte géologique de la région du lac du Bouchet (Haute-Loire, France) et carte bathymétrique du lac [d'après Bonifay, Creer *et al.*, 1987]. Localisation des carottages LDB X (X) et LDB H (H).

FIG. 1. – *Geological map of the lac du Bouchet area (Haute Loire, France) and bathymetric map of the lake [after Bonifay, Creer* et al., *1987].*

III. – DESCRIPTION DES CAROTTES

Les sédiments étudiés sont des dépôts fins de texture argileuse à silto-argileuse. De nombreux débris végétaux ont été observés (feuilles, mousses). Bien qu'une légère hétérogénéité apparaisse d'une carotte à l'autre, nous avons établi cinq unités sédimentaires majeures à partir de leur description visuelle (couleur, texture, aspect du sédiment) (fig. 2). Nous avons retrouvé là les différents « membres sédimentaires » décrits dans les travaux de E. Truze [1990]. Dans un deuxième temps, nous avons recalé ces unités sédimentaires par rapport aux épisodes climatiques définis par la palynologie.

L'unité V se compose d'une argile silteuse beige homogène, présentant quelques lits turbiditiques. Ceux-ci sont essentiellement sableux et composés de 99 % de minéraux détritiques, ils traduisent l'instabilité des dépôts de prisme littoral [Bonifay et Truze, 1987]. Elle est suivie par un niveau de quelques centimètres où couleur et texture changent progressivement vers un sédiment laminé noirâtre. Cette unité, que nous avons appelée unité de transition, est condensée sur 10 cm dans la carotte LDB H, alors qu'elle s'étend sur plus de 30 cm dans la LDB X.

La sédimentation organique s'installe véritablement dans l'unité III. Elle débute dans la carotte LDB X par 40 cm de sédiments laminés formés de débris végétaux grossiers mêlés à une matrice de texture argileuse (sous-unité IIIB), le tout surmonté d'un niveau d'argile organique ou gyttja (sous-unité IIIA). Dans la carotte LDB H, ce niveau de fibres organiques est absent et le sédiment apparaît comme une argile organique finement litée ; seuls quelques macrorestes végétaux sont visibles à la base (1 à 3 cm).

Ce niveau de fibres végétales a déjà été décrit ailleurs [Truze, 1990 ; Bonifay, Creer *et al.*, 1987 ; Reille et de Beaulieu, 1988], mais son épaisseur n'excède jamais 10 cm. La séquence se poursuit par des intercalations d'argiles organiques brunes plus ou moins foncées (unité II) et enfin par 40 cm de sédiments argileux homogènes brun-rougeâtres (unité I). Le sédiment de l'unité I se présente sous la forme d'un silt argileux sans stratification. Cette homogénéité peut être liée soit à l'établissement d'une faune benthique associée à une oxygénation du fond due au turn-over de la masse d'eau [Casta, 1991], soit à une déstratification due à la remontée de gaz [Truze, 1990].

IV. – SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE

Le passage Würm – Holocène a été précisé à l'aide des profils de susceptibilité magnétique. La variation de la susceptibilité magnétique dépend des variations quantitatives et qualitatives des apports détritiques de grains magnétiques [Thouveny, 1991]. Les sédiments organiques holocènes possèdent une susceptibilité magnétique très faible ($k < 10^{-3}$ SI) par rapport aux sédiments tardi-glaciaires constitués essentiellement de minéraux volcaniclastiques ($2.10^{-3} < k < 10^{-2}$).

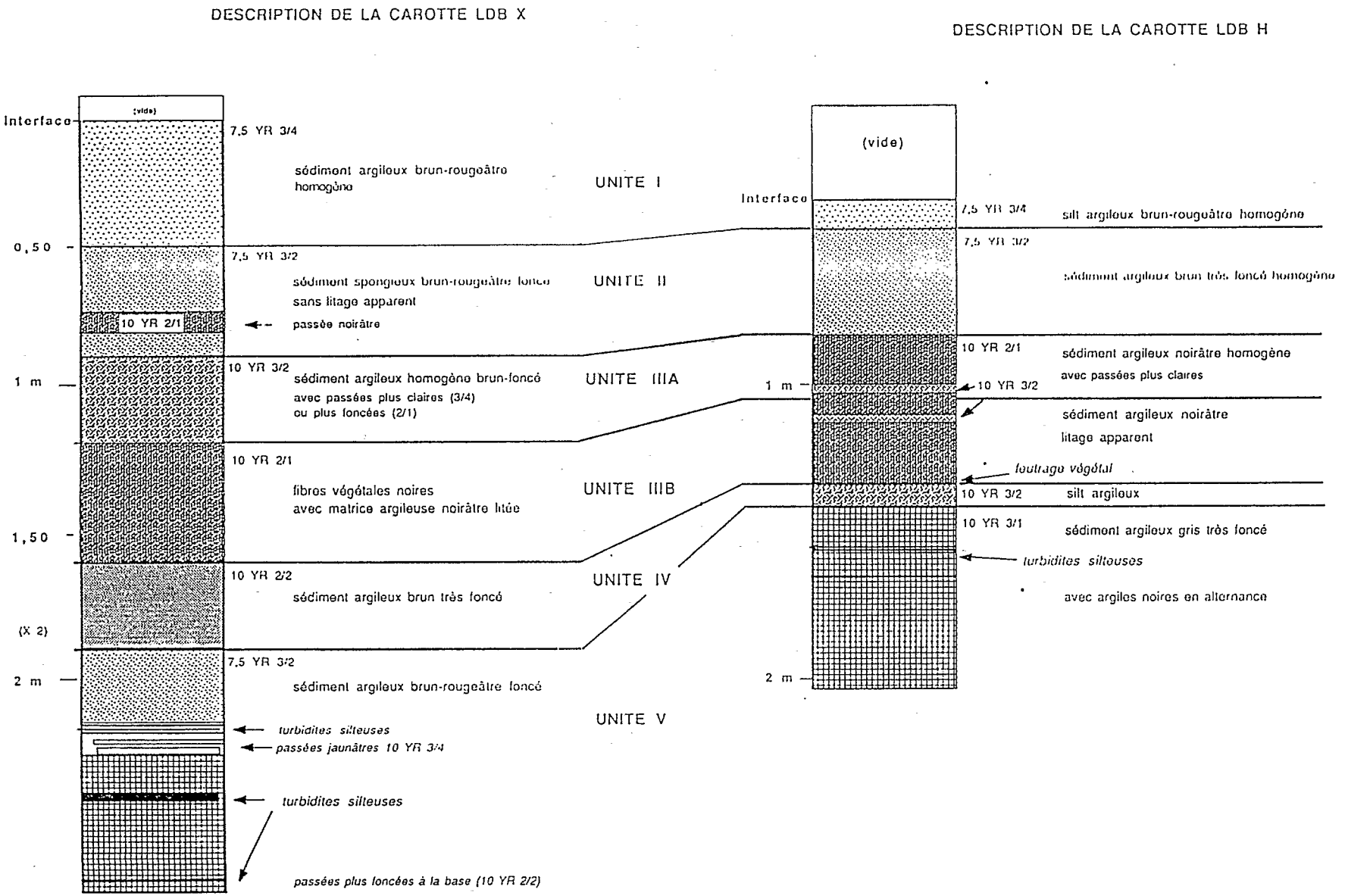


FIG. 2. – Principales unités sédimentaires établies à partir de la description des carottes.
FIG. 2. – *Main sedimentary units determined after cores description.*

Les faibles susceptibilités magnétiques observées dans l'Holocène sont liées à un rapport organique-minéral plus élevé que dans le Tardi-Würm, mais aussi à des phénomènes de réduction et de dissolution des particules magnétiques liée à la dégradation de la matière organique [Williamson, 1991]. Le changement drastique observé sur les profils de susceptibilité magnétique de nombreuses carottes du Bouchet a été recalé autour de 13 000 B.P. (passage Dryas Ancien – Bølling-Allerød), à l'aide de datations radiocarbones, du paléomagnétisme et des diagrammes polliniques [Thouveny *et al.*, 1990]. On peut de ce fait, considérer que ce niveau se situerait vers 1,90 m pour la carotte LDB X et vers 1,40 m pour la carotte LDB H (fig. 3).

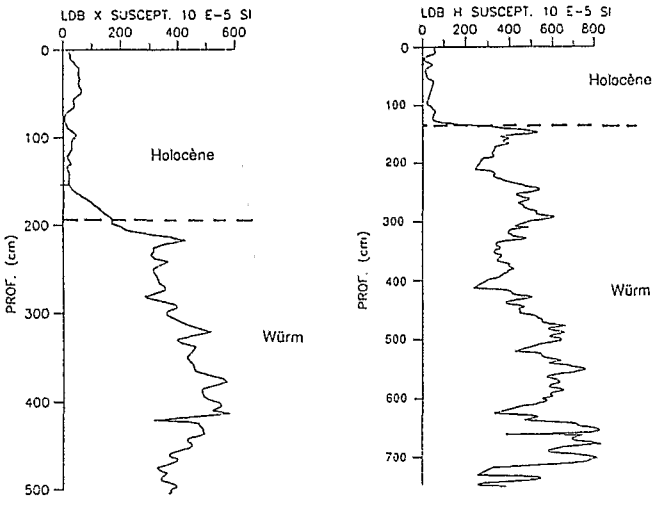


FIG. 3. – Profils de susceptibilité magnétique.
FIG. 3. – *Magnetic susceptibility measurements.*

V. – COMPOSITION ORGANO-MINÉRALE

A) Lithologie

L'étude des frottis permet de préciser la lithologie de chaque unité. L'observation conjuguée des fractions fines – organiques et minérales – montre que, en estimation de surfaces, la fraction minérale est plus abondante que la fraction organique dans l'unité V ; cette tendance s'inverse au passage de l'unité IV. De la même manière, la taille moyenne des grains diminue nettement au cours de l'unité IV soulignant le passage des silts aux argiles ou silts argileux. Ces observations indiquent en outre la présence de développement de diatomées au passage de l'unité IV à l'unité IIIB, au passage de l'unité II à I, et dans l'unité I.

La présence de l'algue *Botryococcus braunii* est mise en évidence à partir de la base de l'unité III dans les deux carottes.

B) La fraction organique

Géochimie organique

Les paramètres issus de la pyrolyse Rock Eval ont été obtenus sur les deux carottes. La carotte LDB H, qui a été échantillonnée à haute résolution (tous les 2 cm), met en évidence une plus grande hétérogénéité des valeurs que la LDB X.

Les profils de COT montrent des variations importantes d'une unité sédimentaire à l'autre (fig. 4). Inférieures à 1 % dans l'unité V, les teneurs en carbone organique augmentent jusqu'à 10 % au travers de l'unité IV pour atteindre les plus fortes valeurs (15 à 30 %) dans l'unité II. La carotte LDB X présente un pic de COT dans l'unité IIIB qui correspond au tapis de fibres végétales décrit plus haut. Les teneurs diminuent à la fin de l'unité II pour se stabiliser aux alentours de 10 % dans l'unité I.

Parallèlement, les valeurs d'IH très faibles dans l'unité V (150 mg HC/g Corg) augmentent jusqu'à des valeurs de 500 dans les unités IIIB et II de la carotte LDB X ; dans la LDB H, seule l'unité II enregistre de fortes valeurs d'IH (jusqu'à 800). Ces dernières se stabilisent autour de 250-300 à la fin de l'unité II. D'une manière générale, COT et IH sont bien corrélés (fig. 4), soulignant la relation existant entre la quantité de matière organique accumulée et sa qualité géochimique (matière organique très hydrogénée).

a) Composition de la matière organique isolée (pl. I)

L'étude optique de la matière organique isolée après attaque HF-HCl (palynofaciès) permet de caractériser les constituants organiques majeurs de chaque unité.

La matière organique est essentiellement constituée de débris végétaux ligno-cellulosiques (translucides, rougeâtres ou opaques), de cuticules, de membranes, de spores et de pollens mais aussi de matière organique amorphe (rougeâtre et grisâtre) (pl. I). Seules les distributions verticales des quatre constituants majeurs sont présentés ici : les débris ligno-cellulosiques translucides et opaques, les débris carbonisés et la matière organique rougeâtre (fig. 5).

Les débris ligno-cellulosiques translucides présentent des proportions très variables. Absents dans l'unité V, on les rencontre surtout dans l'unité IIIB (LDB X notamment), dans l'unité II (LDB H) et dans l'unité I (LDB X et LDB H). Les fibres végétales décrites dans l'unité IIIB de la carotte LDB X se révèlent être des fragments de mousses aquatiques, du genre *Fontinalis*.

Les débris végétaux opaques sont de deux types. Certains sont des débris totalement noirs avec une morphologie dentelée (pl. I). Il s'agit de témoins d'incendies de forêt ; ceux-ci se rencontrent dans des proportions allant de 2 à 5 % sur l'ensemble des carottes, mais atteignent 15 % au début de l'unité I.

D'autres sont des débris végétaux très bruns aux formes émoussées (pl. I). Ils se rencontrent en faible proportion dans les quatre premières unités alors qu'ils constituent l'essentiel de la fraction organique dans l'unité V. L'étude en spectroscopie infra-rouge de la matière organique isolée, le long de la carotte LDB X, permet de préciser le caractère oxydé de cette matière organique. La figure 6 présente la variation verticale de l'indice d'oxydation de la matière or-

ganique défini par Benalioulhaj et Trichet [1990] à partir des bandes IR. Elle montre clairement le changement brutal d'état d'oxydation au passage de l'unité IV.

La matière organique amorphe présente deux faciès majeurs. Soit elle est en granules de couleur brun-rouge associés aux débris végétaux brun-rougeâtres (pl. I), soit elle est d'aspect grumeleux et de couleur grisâtre associée à des débris végétaux bien préservés (pl. I).

La nature de la matière organique brun-rougeâtre se compare aux produits de dégradation des débris végétaux identifiés dans les sols du bassin versant par l'étude pétrographique de leur matière organique. Elle s'apparente aux pigments bruns résultant de la condensation des tanins et des protéines lors de la sénescence des tissus foliaires et des phases initiales de l'humification [Toutain, 1984]. Ces témoins de la pédogenèse sont présents sous forme d'un pic isolé à la fin de l'unité V, puis leur proportion augmente au travers de l'unité IV pour atteindre environ 20-25 % dans les unités IIIA et II. Ensuite leur proportion diminue de nouveau (fig. 5). Les plus forts indices d'hydrogène sont associés aux niveaux riches en matière organique amorphe rougeâtre, comme l'unité II de la LDB H (fig. 4). Toutefois, la présence simultanée de nombreux pollens et cuticules peut également expliquer ces fortes valeurs [Tissot et Welte, 1984].

L'origine de la matière organique amorphe grisâtre n'a pu être déterminée. Elle est le plus souvent décrite en association avec des débris ligno-cellulosiques et des cuticules bien conservés. Bien qu'observée en proportions très variables, elle reste un constituant abondant dans les quatre unités supérieures (fig. 5). Cette matière organique est absente dans les sols ; elle pourrait donc correspondre, en première hypothèse, à un constituant autochtone (algaire ou bactérien).

La distribution verticale de la composition organique (pétrographique et géochimique) des sédiments n'est pas totalement identique d'une carotte à l'autre, ce qui plaide une nouvelle fois en faveur d'une variabilité spatiale de la sédimentation au sein du lac. D'une manière générale, la carotte LDB H, située au centre du lac, présente des particules organiques de plus petite taille que celles de la carotte LDB X. Ainsi, les débris ligno-cellulosiques sont beaucoup plus abondants dans la carotte LDB X et à l'inverse, la matière organique amorphe est beaucoup plus abondante dans la carotte LDB H. Ce phénomène pourrait correspondre à un vannage des particules au travers du lac.

C) La fraction minérale

L'analyse minéralogique par diffraction des RX des sédiments bruts révèle un cortège volcaniclastique classique en liaison avec l'environnement basaltique du lac (quartz, feldspath, hornblende, biotite). La pyrite a été mise en évidence dans les niveaux les plus riches en matière organique. Les argiles ne sont identifiables (diffraction RX) que dans l'unité V. Il s'agit d'illite, de chlorite et de kaolinite. Ce

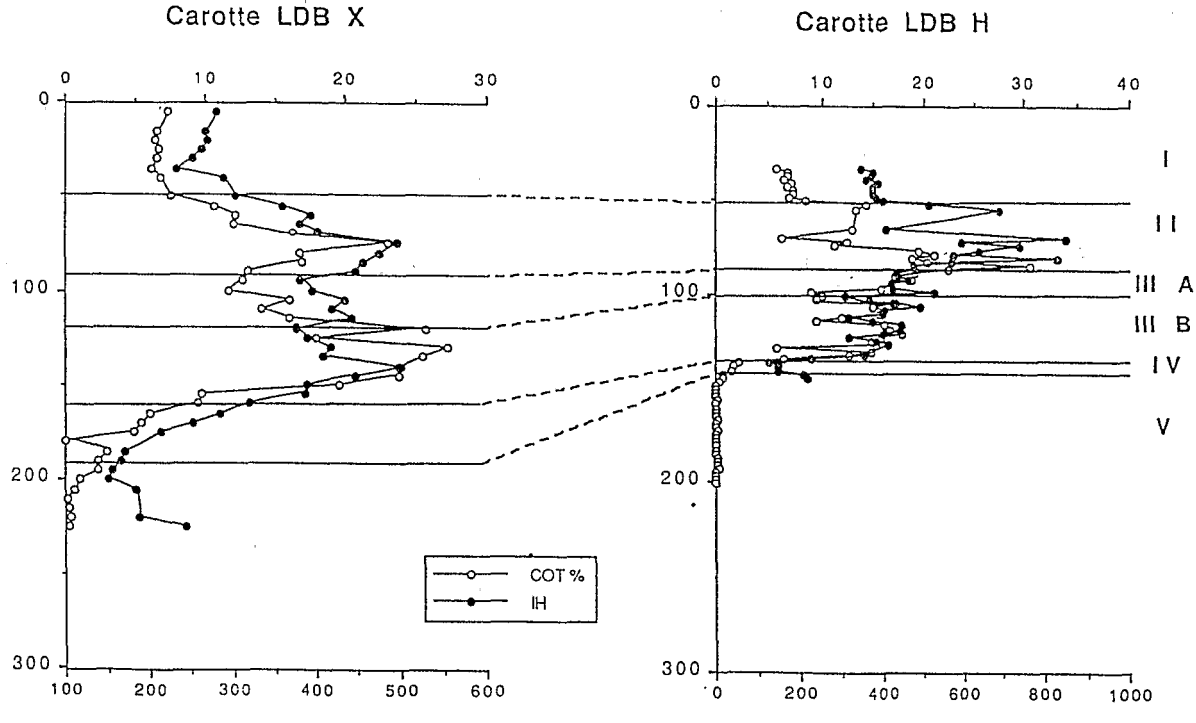
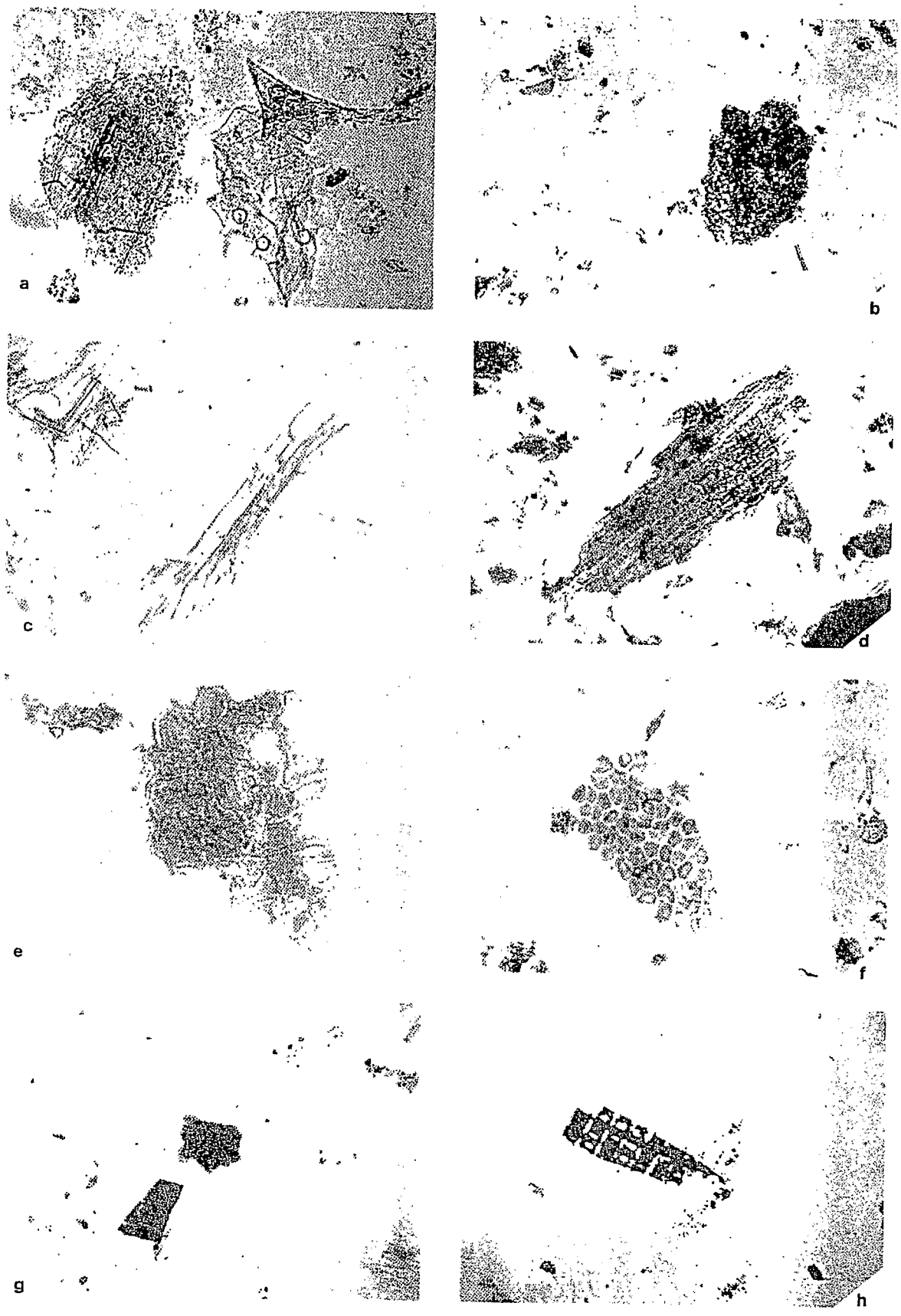


FIG. 4. – Profil des teneurs en carbone organique total (COT en %) et des indices d'hydrogène (IH en mgHC/g Corg) le long des unités sédimentaires des carottes LDB X et LDB H (prof. en cm).

FIG. 4. – *Total organic carbon (%TOC) and hydrogen indices (mgHC/g Corg) along the sedimentary units of LDB X and LDB H (depth in cm).*


a
b
c
d
e
f
g
h

sont des minéraux argileux caractéristiques d'une altération pédogénétique de matériel volcanique. L'analyse infrarouge des sédiments des unités supérieures indique que les fractions fines contiennent des phases amorphes.

La composition chimique globale (spectrométrie EDS) des sédiments souligne les variations de la minéralogie. Les variations de composition minérale sont de faible amplitude sur le premier mètre alors qu'un changement brutal s'opère au passage de l'unité IV. Le rapport pondéral Si/Al fait ressortir l'abondance de silice dans certains niveaux : le passage de l'unité IV à l'unité IIIB, la base de l'unité II ainsi qu'à l'intérieur de l'unité I (fig. 7). Ces enrichissements correspondent aux développements de diatomées (Si amorphe) décrits par la lithologie.

Les distributions verticales du soufre total dans les deux carottes font apparaître 2 pics : l'un dans l'unité IIIB, l'autre dans l'unité II. On retrouve le comportement spécifique du soufre (pyrite) en relation avec le COT traduisant le rôle important de cet élément dans les processus de diagenèse précoce de la matière organique (fig. 8). En milieu anaérobie et en présence de sulfates, la dégradation de la matière organique par les bactéries sulfato-réductrices est le principal processus de reminéralisation de la matière organique. En milieu lacustre à teneur réduite en sulfates, l'efficacité de cette réaction sera donc fonction à la fois de la disponibilité en sulfates du milieu et de l'apport en matière organique métabolisable par les bactéries. Dans ce cas précis, la corrélation existant entre le profil de soufre et celui du carbone résiduel (COT), permet de penser que la réaction a été favorisée par un apport en matière organique métabolisable (probablement autochtone).

VI. – Comparaison avec les résultats de la palynologie

A) Palynologie (fig. 9)

Les diagrammes polliniques ont permis de mettre en évidence les différents épisodes climatiques du Tardi-Würm et de l'Holocène, et de corréler les deux carottes. Le résultat le plus marquant est la disparité de l'enregistrement sédimentaire des épisodes climatiques entre les deux carottes. Dans la carotte LDB H, le Boréal repose directement sur le Dryas ancien et on observe là un hiatus complet des épisodes tardi-glaciaires : Bølling, Allerød, Dryas récent et Pré-Boréal. Dans la carotte LDBX, seuls le Dryas récent et le Pré-Boréal ne sont pas représentés. Par ailleurs, on retrouve un meilleur recouvrement du Sub-Atlantique dans la LDB X par rapport à la LDB H dû au mode de prélèvement Mackereth moins perturbant. Au total, la série Tardi-Würm – Holocène apparaît plus condensée dans la LDB H que dans la LDB X.

L'ensemble de nos résultats, confronté à ceux de la palynologie, mais également à ceux d'études antérieures réalisées sur d'autres carottes du lac du Bouchet et recalées par des datations radiométriques [Creer *et al.*, 1986; Bonifay, Creer *et al.*, 1987; Reille et de Beaulieu, 1988, 1990; Thouveny *et al.*, 1990; Casta, 1991; Paillès, 1989] nous permet d'interpréter la composition organique des sédiments, en termes de paléoenvironnements de dépôt (environnement climatique général et bassin versant).

B) Interprétation (fig. 10)

1) Würm

Le Würm se caractérise par une matière organique très peu abondante, constituée majoritairement de débris oxydés. Les sédiments volcaniclastiques et leur nature silteuse indiquent une forte érosion du bassin versant, donc un très faible couvert végétal et un climat sec. Pendant cet épisode, les spectres polliniques à *Gramineae, Artemisia et Pinus* – ce dernier d'origine certainement lointaine – sont caractéristiques d'une steppe développée sous climat froid.

2) Tardi-Glaciaire

Cet épisode est caractérisé par une légère augmentation du carbone organique expliquée par l'augmentation de débris végétaux soit bien préservés, soit pédogénétisés et par la diminution concomittante des débris végétaux oxydés. Cette augmentation atteint un maximum au Bølling soulignant une étape du début du réchauffement [Bonifay, Creer *et al.*, 1987]. Ce réchauffement du Bølling est visible en palynologie par une légère augmentation des fréquences de *Betula et Juniperus*. Puis le réchauffement a conduit à l'établissement d'une forêt de *Pinus* (Allerød) jusque sur le bassin versant avec développements de sols. Il est à noter que la carotte LDB H enregistre cet événement sédimentaire par les pollens vers 143 cm. Pourtant dès le niveau 150 cm, le contenu organique global du sédiment augmente légèrement et sa qualité change (meilleure préservation). Cela

---

Planche I – Plate I

a – 1 : matière organique amorphe grisâtre, 2 : cuticule, 3 : membrane. – 1 : *greyish organic amorphous matter, 2 : cuticle, 3 : membranous fragments.*

b – matière organique amorphe rougeâtre – *reddish organic amorphous matter.*

c – débris ligno-cellulosique translucide (bien préservé) – *translucent ligno-cellulosic debris (well preserved).*

d – débris ligno-cellulosique rougeâtre (pédogénétisé) – *reddish ligno-cellulosic debris (pedogenetic).*

e – cuticule très dégradée (pédogénétisée) – *strongly degraded cuticle (pedogenetic).*

f – cuticule – *cuticle.*

g – débris ligno-cellulosique opaque (oxydé) – *opaque ligno-cellulosic debris (oxidised).*

h – débris lignocellulosique carbonisé ou pyrofusinite – *carbonized lignocellulosic debris or pyrofusinite.*

pourrait indiquer une réponse de la biomasse au changement climatique, plus rapide au niveau local (lac et bassin versant) qu'au niveau régional. La lacune du Dryas récent dans les carottes étudiées confirme l'hétérogénéité des spectres polliniques obtenus pour cette période dans les différentes carottes du lac du Bouchet [Reille et de Beaulieu, 1988, 1990]. Cette hétérogénéité spatiale pourrait s'expliquer par le faible taux de sédimentation enregistré pour cette période (0,02 mm/yr).

3) Pré-Boréal, Boréal

Tous les caractères transitionnels de ces sédiments (lithologie, minéralogie, géochimie, pétrographie organique) s'inscrivent dans la logique d'un changement climatique majeur. La quantité de matière organique sédimentée continue à augmenter, ainsi que sa qualité géochimique (matière organique de plus en plus hydrogénée). Le changement de nature de matière organique décrit dans le Tardi-Glaciaire

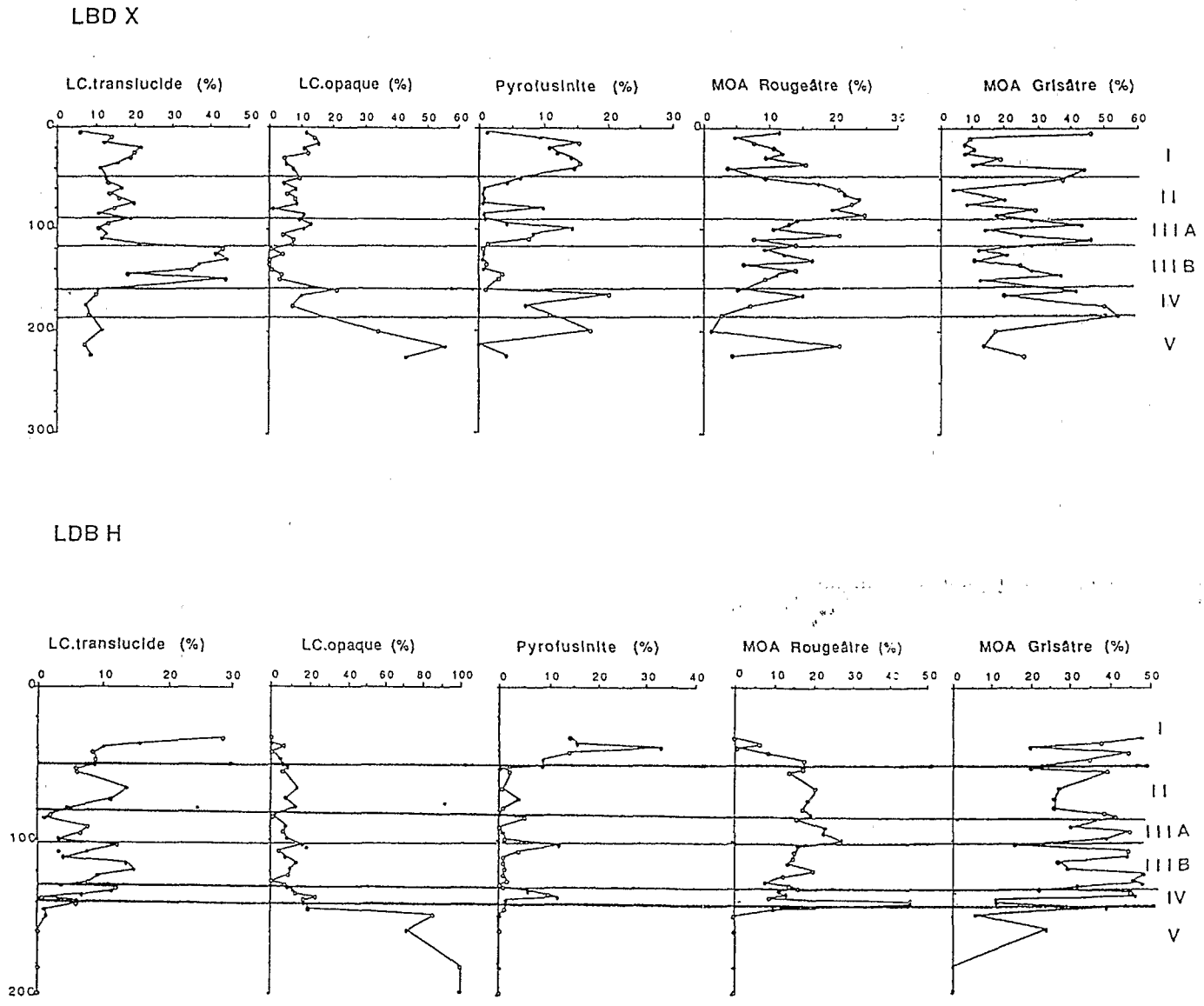


FIG. 5. – Composition de la matière organique isolée (palynofaciès) des carottes LDB X et LDB H (profondeur en cm). LC.translucide = ligno-cellulosiques translucides (bien préservés); LC.opaque = ligno-cellulosiques opaques (oxydés); pyrofusinite = débris carbonisés; MOA Rougeâtre (matière organique amorphe rougeâtre) = produit de pédogenèse; MOA Grisâtre (matière organique amorphe grisâtre) = matière organique autochtone ?

FIG. 5. – *Petrographical composition (palynofacies) of LDB X and LDB H (depth in cm).* LC.translucide = *translucent ligno-cellulosic debris (well preserved);* LC.opaque = *opaque ligno-cellulosic debris (oxidized);* pyrofusinite = *carbonized debris.* MOA Rougeâtre *(reddish amorphous organic matter) = pedogenetic product;* MOA Grisâtre *(greyish organic amorphous matter) = autochthonous organic matter ?*

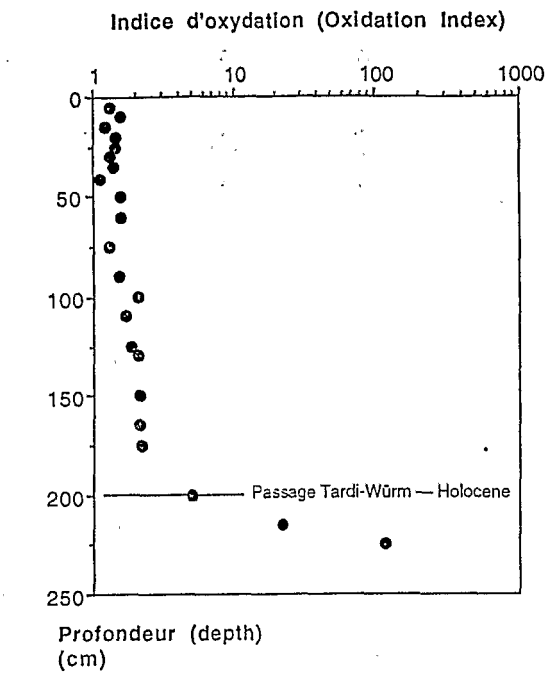


FIG. 6. – Distribution du degré d'oxydation de la matière organique le long de la carotte LDB X. Ce degré d'oxydation est déterminé à partir du rapport des surfaces de bandes infra-rouges ((1 710 cm^{-1} + 1 610 cm^{-1})/2 900 cm^{-1}) [d'après Benalioulhaj and Trichet, 1990].

FIG. 6. – *Profile of oxidation degree of organic matter along the LDB X core. This oxidation degree is determined from the ratio of IR band areas : ((1 710 cm^{-1} + 1 610 cm^{-1})/2 900 cm^{-1}) [after Benalioulhaj and Trichet, 1990].*

se renforce. Les algues (diatomées, *Botryococcus*) sont abondantes. Les débris végétaux oxydés deviennent minoritaires.

La palynologie indique l'augmentation et la diversification du couvert végétal (*Corylus, Quercus, Ulmus*) liées au réchauffement climatique [Reille et de Beaulieu, 1988].

4) Atlantique

Cet épisode est marqué par des teneurs en matière organique importantes. Le passage du Boréal à l'Atlantique est souligné dans la LDB X par la mise en place de débris végétaux grossiers bien préservés provenant d'un développement intense de végétation de bordure (mousses aquatiques) dont la mise en place s'est probablement effectuée par des apports massifs lors de fortes pluies. Ces mousses aquatiques ne se retrouvent pas dans toutes les carottes du lac du Bouchet (c'est le cas de la LDB H), sans doute en raison de leur mode de dépôt.

Ces niveaux de fibres végétales ont été datés dans d'autres carottes du lac du Bouchet entre 8090 BP ± 190 pour la base et 5390 BP ± 170 pour le sommet (datations radiocarbone; Michel Icole, com. pers.). Ces datations confirment l'appartenance de ces mousses à l'épisode atlantique.

Le développement de l'algue *Botryococcus braunii* ainsi que des diatomées montre l'installation de conditions favorables à une productivité primaire intense, contemporaine de l'épanouissement de la couverture végétale régionale (*Quercus, Tilia, Corylus*) typique de l'Atlantique – chaud et humide – considéré comme l'optimum climatique de l'Holocène.

5) Sub-Boréal

Le Sub-Boréal est marqué par un changement de sédimentation (passage de l'unité IIIA à l'unité II). Le début du Sub-Boréal (sommet de l'unité IIIA) enregistre une légère diminution de la teneur en matière organique. Celle-ci réaugmente au cours du Sub-Boréal pour atteindre un maximum au passage Sub-Boréal – Sub-Atlantique. Les témoins de pédogenèse sont beaucoup plus abondants par rapport à l'Atlantique. Les diagrammes polliniques indiquent le développement régional de la forêt à *Fagus*.

6) Sub-Atlantique

Le Sub-Atlantique est représenté par deux unités sédimentaires (sommet de l'unité II et unité I). Le début du Sub-Atlantique enregistre les plus fortes valeurs de carbone organique liées à des débris végétaux bien préservés et à des débris pédogénétisés.

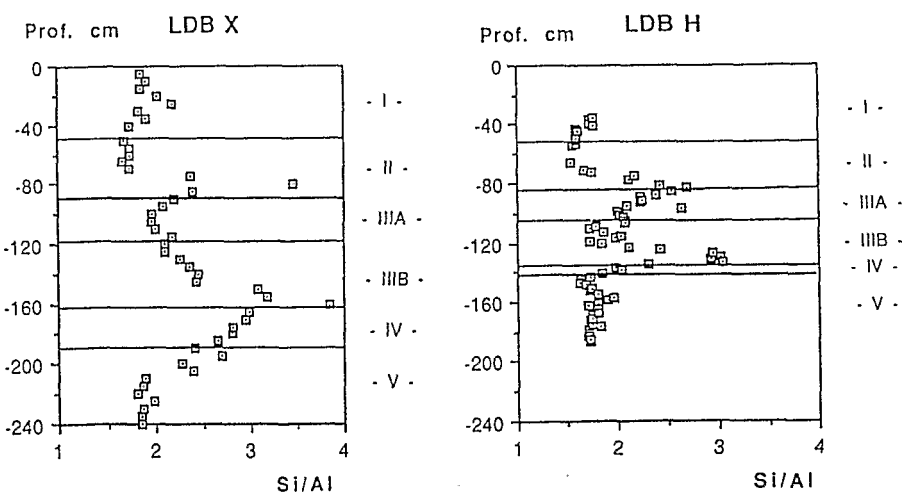


FIG. 7. – Distribution du rapport Si/Al du sédiment total le long des unités sédimentaires des carottes LDB X et LDB H.

FIG. 7. – *Distribution of Si/Al ratio from bulk sediment along the sedimentary units of LDB X and LDB H.*

Vers la fin de cet épisode, les constituants amorphes (notamment la matière organique grisâtre) deviennent majoritaires et représentent jusqu'à 50 % de la matière organique tandis que les débris végétaux figurés diminuent (20 %). Des développements d'algues (diatomées, algues sans test) interviennent. Les pollens de *Fagus et Abies* diminuent et les céréales augmentent (sédentarisation de l'homme). Les témoins d'incendies réapparaissent plus nombreux, sans doute en liaison avec l'activité anthropique.

VII. – CONCLUSIONS

Des résultats qui précédent, il apparaît que la sédimentation de la matière organique est sensible aux variations climatiques, même lorsqu'elles sont de faible amplitude. Son abondance varie ainsi que sa nature et son état de préservation.

Nous avons également montré que les unités sédimentaires qui possèdent des caractéristiques sédimentologiques précises, sont légérement décalées par rapport aux épisodes climatiques établis à partir de la palynologie. Ce décalage entre l'enregistrement sédimentaire de l'événement climatique à l'échelon local et son signal palynologique peut s'expliquer par la situation en altitude du lac du Bouchet (1 200 m), qui imprime un certain retard « climatique » par rapport aux vallées voisines.

Les sédiments glaciaires sont des sédiments volcaniclastiques très pauvres en matière organique. Le peu de matière organique présente est oxydée. Cela s'explique par une couverture végétale réduite et des phénomènes de dégradation très accentués, sur le bassin versant. Ce phénomène a déjà été décrit lors de l'étude de carottes de 50 m de profondeur

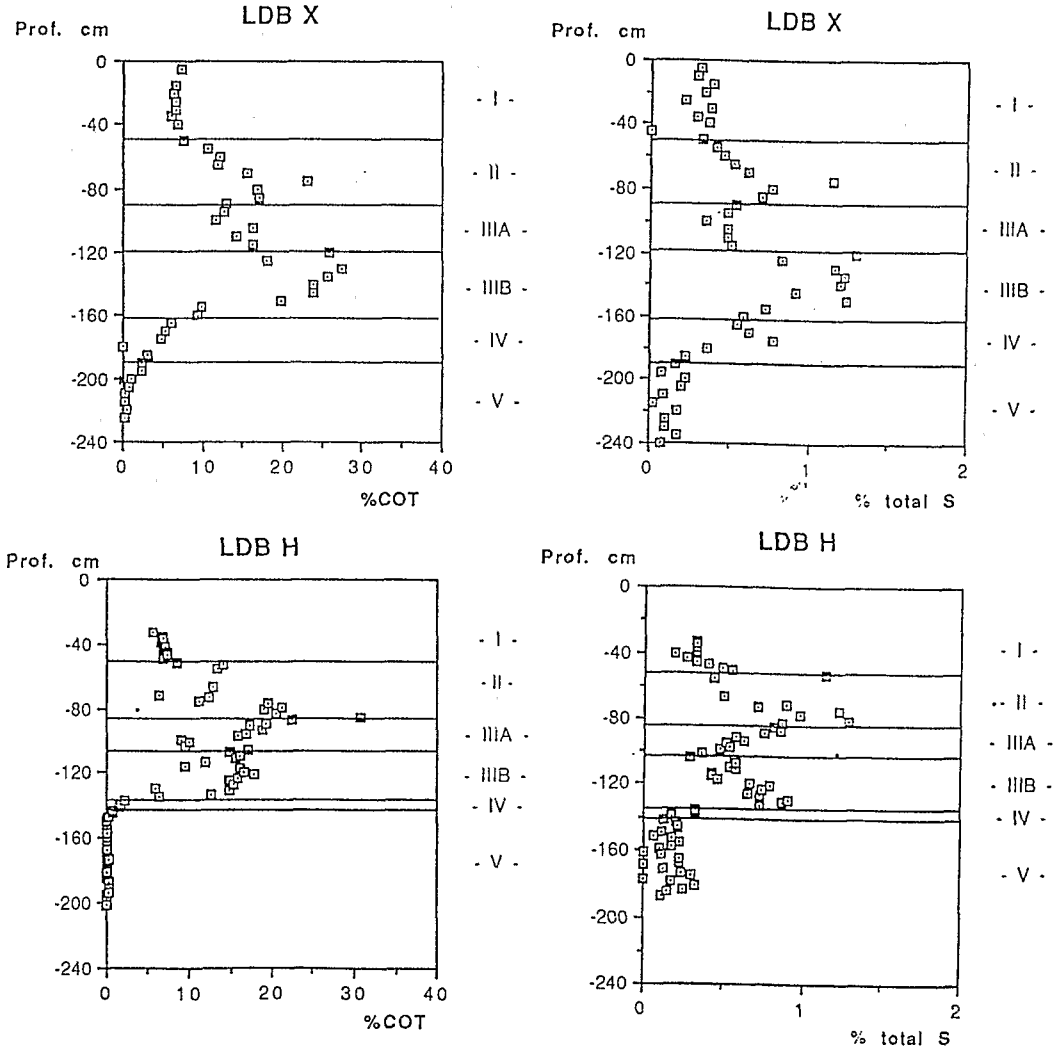


FIG. 8. – Comparaison des profils de COT et de S total (%) du sédiment total dans les carottes LDB X et LDB H.

FIG. 8. – *Comparison between TOC and total S contents (%) of bulk sediment in LDB X and LDB H cores.*

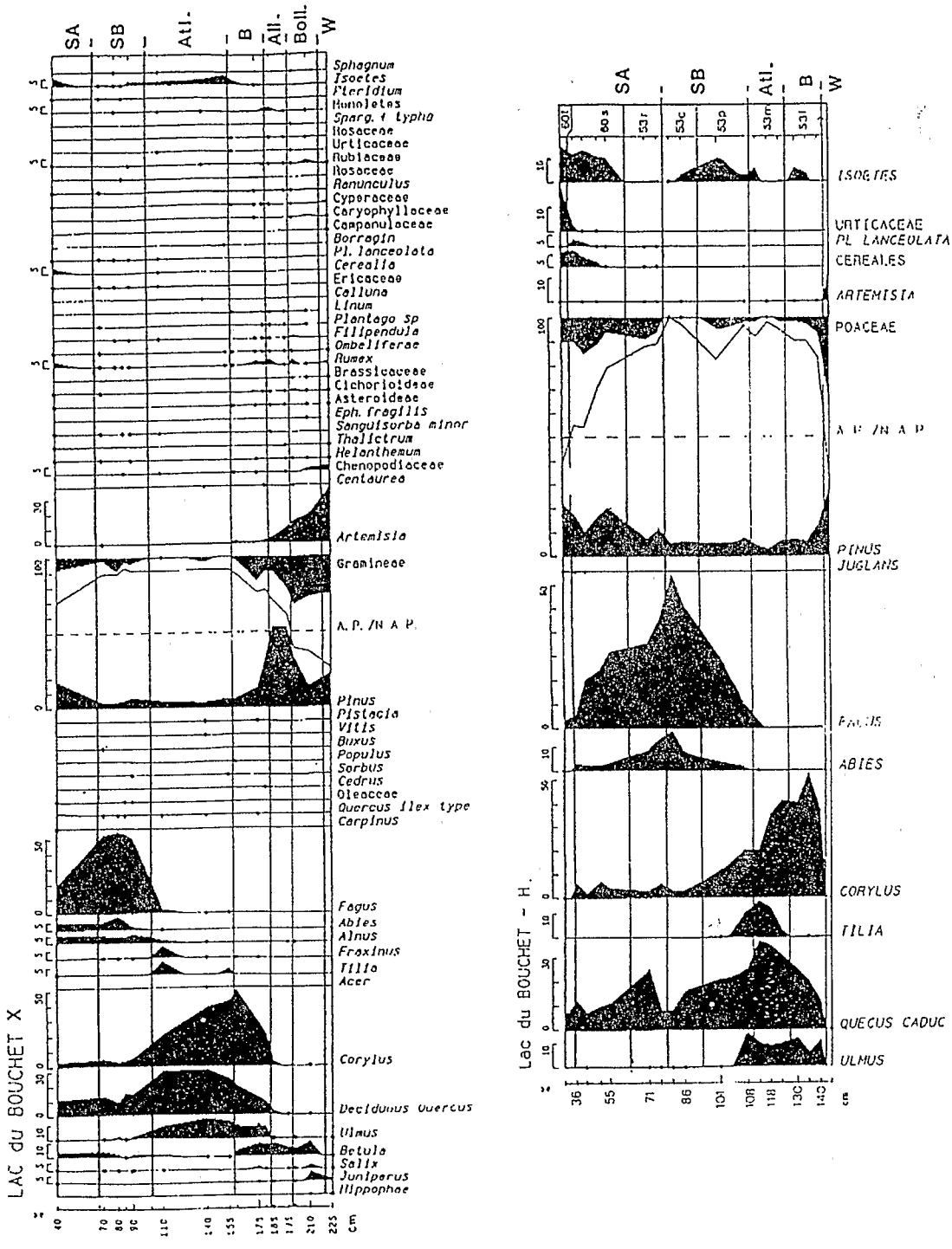


FIG. 9. – Diagrammes palynologiques des carottes LDB X et LDB H.
FIG. 9. – *Palynological data from LDB X and LDB H cores.*

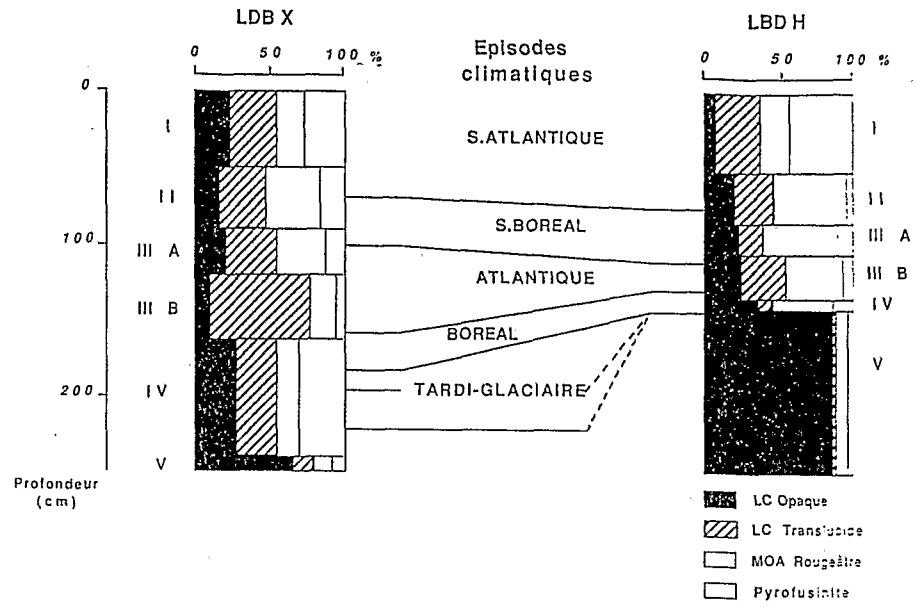


FIG. 10. – Interprétation climatostratigraphique de la composition organique des sédiments.

FIG. 10. – *Climatostratigraphic interpretation of the organic composition of sediments.*

du lac du Bouchet qui recoupait plusieurs alternances glaciaire-interglaciaire [Bertrand *et al.*, 1992].

Les sédiments holocènes contiennent de la matière organique sous diverses formes. Ils enregistrent au travers de leur sédimentation organique :

— les variations du couvert végétal à l'échelle de la région et du bassin versant,
— le développement de sols sur le bassin versant,
— la productivité du lac,
— l'influence anthropique.

Les périodes chaudes et humides (Atlantique) fossilisent des teneurs élevées en matière organique fortement hydrogénée. La matière organique sédimentée est formée d'un assemblage de débris végétaux bien conservés et de matière organique amorphe grisâtre. Un épisode climatique un peu plus frais et plus sec, comme le Sub-Boréal, fossilise des débris organiques qui indiquent une pédogenèse plus active sur le bassin versant.

La matière organique des sédiments peut ainsi rendre compte d'une part de l'évolution du bassin versant et du lac en termes de biomasse mais également en termes de processus de dégradation.

Il semble par ailleurs, que la sédimentation organique présente une certaine hétérogénéité spatiale. Cela pourrait être liée à des apports différentiels des particules dus à des circulations sous-lacustres. La carotte la plus centrale présente beaucoup moins de débris cellulosiques que l'autre.

Toutefois, si l'impact du climat sur la composition organique des sédiments apparaît ici de façon nette, on se rend compte dans le même temps, que la qualité des apports ne détermine pas seule cette composition. Les conditions pédogénétiques et diagénétiques (interface eau-sédiment et colonne sédimentaire) ont également une influence sur elle. Par ailleurs, les conditions de dégradation des produits organiques sont aussi liées au climat et il est très délicat, pour l'instant, de faire la part de chaque paramètre.

L'étude détaillée des différentes fractions organiques des cinquante premiers centimètres de la colonne sédimentaire, c'est-à-dire le Sub-Atlantique (épisode climatique dont les apports organiques peuvent être plus facilement appréhendés), en relation avec l'étude de la colonne d'eau et des eaux interstitielles (études en cours), devrait permettre de répondre en partie à ce problème.

Remerciements. – Nous tenons à exprimer ici notre reconnaissance à E. Bonifay, responsable du programme EUROMAARS, pour avoir mis à notre disposition les carottes et nous avoir fourni une aide précieuse pour débuter ce travail. Nous remercions de la même manière, Michel Icole (LGQ, Marseille) pour les données radiométriques concernant les niveaux à mousses aquatiques. Françoise Champion, Didier Kéravis et Pierre Tremblay sont également remerciés pour leur soutien technique.

Références

BENALIOULHAJ S. & TRICHET J. (1990). – Comparative study by infrared spectroscopy of the organic matter of phosphate-rich (Oulad Abdoun basin) and black shale (Timahdit basin) series (Morocco). – *Org. Geochem.*, **16**, 649-660.

BERTRAND P., BROCERO S., LALLIER-VERGÈS E., TRIBOVILLARD N. & BONIFAY E. (1992). – Sédimentation organique lacustre et paléoclimats du Quaternaire récent aux moyennes latitudes : exemple du lac du Bouchet, Haute-Loire, France (résultats préliminaires). – *Bull. Soc. géol. Fr.*, **163**, 4, 427-433.

BONIFAY E., CREER K.M., de BEAULIEU J.L., CASTA L., DELIBRIAS G., PERINET G., PONS A., REILLE M., SERVANT S., SMITH G., THOUVENY N., TRUZE E. & TUCHOLKA P. (1987). – Study of the Holocene and late Würmian sediments of lac du Bouchet (Haute-Loire, France) : first results. *In :* M.R. RAMPINO, J.E. SANDERS, W.S. NEWMAN and L.K. KÖNIGSSON, Eds. Climate-history, periodicity and predictability. – Van Nostrand Reinhold co., New York, 588 p.

BONIFAY E. & TRUZE E. (1987). – Dynamique sédimentaire et évolution des lacs de maars. – *Doc. CERLAT*, **1**, 29-64.

CASTA L. (1991). – Lac du Bouchet : les structures thermométriques et pHmétriques : mise en œuvre, implications hydrologiques, climatiques et sédimentologiques. – *Doc. CERLAT, mém.*, 2, 97-111.

CREER K.M., SMITH G., TUCHOLKA P., BONIFAY E.,THOUVENY N. & TRUZE E. (1986). – A preliminary palaeomagnetic study of the Holocene and late Würmian sediments of lac du Bouchet (Haute-Loire, France). – *Geophys. J.R. astr. Soc.*, 86, 943-964.

PAILLES C. (1989). – Les diatomées du lac de maar du Bouchet (Massif central, France). Reconstruction des paléoenvironnements au cours des 120 derniers millénaires. – Thèse de l'université d'Aix-Marseille II, 272 p.

REILLE M. & de BEAULIEU J.L. (1988). – History of the Würm and Holocene vegetation in western Velay (Massif central, France) : a comparison of pollen analysis from the three corings at lac du Bouchet. – *Rev. Paleobot. Palynol.*, 54, 233-248.

REILLE M. & de BEAULIEU J.L. (1990). – Pollen analysis of a long upper Pleistocene continental sequence in a Velay maar (Massif central, France). – *Paleogeogr. Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 80. 35-48.

THOUVENY N. (1991). – Variations du champ magnétique terrestre au cours du dernier cycle climatique. – Mémoire d'habilitation à diriger des recherches. – *Doc. CERLAT*, **III**, 380 p.

THOUVENY N., CREER K.M. & BLUNK I. (1990). – Extension of the lac du Bouchet paleomagnetic record over the last 120 000 years. – *Earth Planet. Sci. Lett.*, 97, 140-161.

TISSOT & WELTE (1984). – Chemical composition of the biomass : bacteria, phytoplankton, zooplankton, higher plants. *In :* Petroleum formation and occurrence. – Springer-Verlag, Amsterdam, 699 p.

TOUTAIN F. (1984). – Biologie des sols. *In :* « Livre Jubilaire du cinquantenaire ». – AFES, Paris, 253-271.

TRUZE E. (1990). – Etudes sédimentologique et géochimique des dépôts du maar du Bouchet (Massif central, France). Evolution d'un système lacustre au cours du dernier cycle climatique. – Thèse de doctorat en Sciences, Univ. Aix-Marseille II, 242 p.

WILLIAMSON D. (1991). – Propriétés magnétiques de séquences sédimentaires de Méditerranée et d'Atlantique intertropical. Implications environnementales et géomagnétiques pour la période 30 à 0 Ka BP. – Thèse de doctorat en Sciences, Univ. Aix-Marseille II, 230 p + annexes.