Etude géochimique des sédiments du lac du Loclat (Neuchâtel, Suisse) : evolution de l'impact anthropique

Autor(en): **Steinmann, Philipp / Matera, Virginie / Adatte, Thierry**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles**

Band (Jahr): **126 (2003)**

PDF erstellt am: **30.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-89595

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

ETUDE GÉOCHIMIQUE DES SÉDIMENTS DU LAC DU LOCLAT (NEUCHÂTEL, SUISSE) : EVOLUTION DE L'IMPACT ANTHROPIQUE

PHILIPP STEINMANN[1], VIRGINIE MATERA[1], THIERRY ADATTE[1], GABRIELLE SCHWAB[1], GAËL COMMENT[1], CLAUDE GIRARDIN[1], JEAN-LUC LOIZEAU[2] & KARL FÖLLMI[1]

[1] Institut de Géologie, Université de Neuchâtel, Rue Emile-Argand 11, CH-2000 Neuchâtel, Suisse

[2] Institut F.-A. Forel, Université de Genève, 10 route de Suisse, CH-1290 Versoix, Suisse

Mots-clés: métaux lourds, plomb, matière organique, pollution, sédiments lacustres, eutrophisation, minéralogie

Keywords: heavy metals, lead, organic matter, pollution, lake sediments, eutrophication, mineralogy

Résumé

Deux carottes courtes (80 cm) prélevées en 2002 dans le lac du Loclat (Ne) montrent la présence de trois lithologies distinctes: (i) en surface (0-40 cm) des limons carbonatés brun-noirs, laminés, riches en matière organique de type "phytoplancton" (4 % de carbone organique (TOC) en moyenne, maximum 6 %) avec des frustules de diatomées et une fraction détritique de source "molassique et/ou morainique"; (ii) des limons carbonatés gris-beige entre 40 et 70 cm, moins riches en matière organique (MO) (de type plutôt "détritique/dégradé") et avec une plus faible teneur en minéraux détritiques de source "jurassienne"; et (iii) des limons carbonatés gris-bruns à la base des carottes (70-80 cm), de nouveau plus riches en MO.

La datation des carottes, à l'aide du Cs-137 et d'une estimation basée sur les teneurs en plomb, indique que les sédiments à la base des carottes ont plus de 200 ans. On constate une nette augmentation de la productivité lors du siècle dernier: l'enfouissement du carbone organique augmente de 62 g C m^{-2} a^{-1} avant 1910 à 218 g C m^{-2} a^{-1} de 1995 à 2002. Cette augmentation de la productivité est également mise en évidence par les rapports Ba/Ca et est certainement liée à l'apport de nutriments d'origine anthropique. Une influence importante du climat ne peut être écartée ni confirmée. La répartition des métaux lourds montre des concentrations plus élevées à partir des années 1950 et un maxima pour le plomb et le zinc (70 ppm de Pb et 315 ppm de Zn) dans les années 60 et 70. Ceci est fortement corrélé aux activités anthropiques (émissions atmosphériques pour le plomb, mise en place de drains, mise en service de stations d'épuration). En ce qui concerne les métaux tels que le Sr, Fe, Mg, Mn, Ba, Ni, Cr et le Co la répartition semble également liée aux apports d'origine molassique.

Summary

Two short sediment cores (80 cm) from lake Loclat (Neuchâtel, Switzerland) have been analysed for heavy metal concentrations, mineralogy and organic matter using ICP-MS, XRD, and Rock-Eval pyrolysis, respectively. The recovered sediments vary from dark brown to black laminated micritic calcite (75%) mud in the top 40 cm to light grey firm massive micritic calcite (>90 %) mud from 40 to 70 cm depth. The top 40 cm of sediments are rich in organic matter ("phytoplankton-type"; average TOC = 4 %, maximum: 6 %), with diatom frustules and a detrital fraction derived from the mollassic/morainic sediments exposed to the south of the lake. The sediments below contain less organic matter ("detrital/degraded-type", TOC=2.5-3 %) and a detrital fraction derived from the sediments of the Jura Mountains to the north of the lake. The deepest sediments are again higher in TOC.

Dating of the cores based on Cs-137 and the first increase of Pb concentrations indicates an age of >200 yrs for the base of the cores. The observed environmental changes include a marked increase of the net primary production of this eutrophic lake over the last century. This is evidenced by a steadily increasing burial flux of organic carbon (from 62 g C m^{-2} a^{-1} before 1910 to 218 g C m^{-2} a^{-1} between 1995-2002) as well as by the increasing Ba/Ca ratios. The heavy metal concentrations are distinctly higher after 1950 and in the case of Pb and Zn reach a maximum in the 1960's and 1970's (70 ppm Pb and 315 ppm Zn, respectively).

INTRODUCTION

Les sédiments lacustres représentent de précieuses archives historiques de l'évolution de l'environnement que ce soit à l'échelle locale, régionale, voire à une échelle plus globale. Ce matériel contient notamment les enregistrements des changements :

- du cadre géologique (apports des éléments détritiques),
- de l'état chimique des eaux (acidité, présence de nutriments ayant une incidence directe sur la productivité, précipitation de la calcite),
- du climat,
- de la nature et des teneurs en contaminants qu'ils soient atmosphériques et/ou présents dans les affluents (concentrations en métaux lourds, en polluants organiques).

L'échelle de temps couvert par de longues carottes de sédiments peut atteindre la fin du dernier âge glaciaire. La présente étude traite des résultats obtenus à partir d'échantillons de sédiments du Lac Loclat prélevés dans des carottes de faible longueur, représentant un enregistrement des évènements couvrant les 200 dernières années. Ce travail est issu des travaux pratiques en sédimentologie/géochimie de l'Institut de Géologie du semestre d'hiver 2002/2003.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le Loclat

Le Loclat (Lac de Saint-Blaise) est un lac de petite dimension de 4.5 ha de superficie pour une profondeur maximale proche de 10 m (CLUB DES AMIS DE LA NATURE, 1907). Ce lac holomictique et eutrophe (SCHWEIZER & ARAGNO, 1975) est localisé à l'est du lac de Neuchâtel dans la commune de St-Blaise. Il se situe entre les calcaires du Jura, au nord, et les sédiments de la Molasse, au sud. Les eaux du lac sont caractérisées par un pH avoisinant 8, une forte teneur en Ca (100 mg/l avant la période de stratification; soit à peu près le double des concentrations mesurées dans le Lac de Neuchâtel) et des teneurs en phosphore total proches de 30 µg P/l dans les eaux de surface (B. POKORNI communication orale et propres mesures).

Pendant la période de stratification des eaux, les eaux profondes sont anoxiques et une zone de sulfatoréduction se développe.

Dans cette zone anoxique, les teneurs en phosphore total dépassent les 100 µg P/l.

Le Loclat a été le sujet de nombreuses études microbiologiques (p.ex. SCHWEIZER & ARAGNO, 1975, CONRAD *et al.*, 1983).

Au cours du siècle dernier la croissance des arbres et des buissons au bord du lac a modifié son aspect (fig. 1). Durant ces 100 dernières années, le Loclat a subi des nombreuses modifications d'origine anthropique, telles que la mise en place de jardins, la canalisation sous terre du Mouson (effluent) ainsi que l'installation de drains sur la rive en 1943 (BAER *et al.*, 1962).

Une longue carotte prélevée au début des années 1990 (HADORN, 1994) a mis en évidence une couche de sédiments de plus de 12 m d'épaisseur, déposés durant la période post-glaciaire (représentant environ 16000 années). Les lithologies rencontrées dans ce forage sont des carbonates authigènes (craie lacustre), des limons carbonatés, argileux ou sableux, avec des intercalations de tourbes (ROLLI & RUCH, 1994).

Dans cette présente étude, plusieurs carottes courtes ont été prélevées en automne 2002, à l'aide d'un carottier type Kullenberg (KELTS *et al.,* 1986). La carotte LO-1 a été prélevée au milieu du lac à l'endroit le plus profond, alors que la carotte LO-3 se situait dans une zone légèrement moins profonde à environ 50 m au nord-ouest de l'emplacement du prélèvement de la première carotte.

Analyse de la matière organique (Pyrolyse Rock-Eval)

La matière organique a été analysée par pyrolyse Rock-Eval 6 selon les méthodes décrites par STEINMANN *et al.* (2003). Lors de cette analyse, l'échantillon est d'abord soumis à une pyrolyse entre 300 °C et 650 °C, il est ensuite oxydé dans un cycle de 400 °C à 850 °C. Cette analyse permet de déterminer le carbone organique pyrolysable (PC), le carbone organique résiduel (RC), le carbone organique total (TOC = PC+RC), le carbone minéral (MINC, présent sous forme des carbonates), ainsi que l'index d'hydrogène (HI) et l'index d'oxygène (OI). Les indices HI et OI permettent de caractériser la matière organique dans les sédiments lacustres (STEINMANN *et al.*, 2003). Des valeurs HI élevées/ OI faibles indiquent une MO de type "phytoplancton", des valeurs HI faibles/ OI élevées sont caractéristiques de la MO détritique (d'origine terrestre) ou dégradée. Si les deux indices sont faibles, il s'agit de MO "tourbeuse" (ou fortement dégradée).

La partie inférieure de la carotte LO-1 (à partir de 20 cm) a uniquement été analysée par pyrolyse. Pour ces échantillons, le TOC a été calculé en utilisant la relation entre le PC et le TOC observés pour la carotte LO-3 (relation linéaire avec r^2 = 0.903).

Minéralogie (XRD)

Des analyses de la roche totale et du résidu insoluble ont été effectuées par diffraction-X pour tenter de caractériser les divers niveaux observés, le but ultime étant de préciser si l'argument minéralogique peut être une aide à la détermination des sources à l'origine de la formation des sédiments du Loclat.

Plus de 60 échantillons prélevés dans la carotte LO-1 ont été préparés selon les méthodes décrites par KÜBLER (1987) et ADATTE *et al.* (1996). L'analyse diffractométrique de ces échantillons a porté sur :

- la roche totale (poudres non orientées),
- le résidu insoluble (fractions <2 et 2-16 µm, préparations orientées).

La séparation des fractions <2 et 2-16 µm (après décarbonatation) a été effectuée par centrifugation, selon la méthode de RUMLEY & ADATTE (1983). Ces préparations ont été analysées à l'aide d'un appareil SCINTAG XRD 2000. L'erreur relative des intensités brutes (exprimées en coups par secondes) varie entre 1 et 2 %

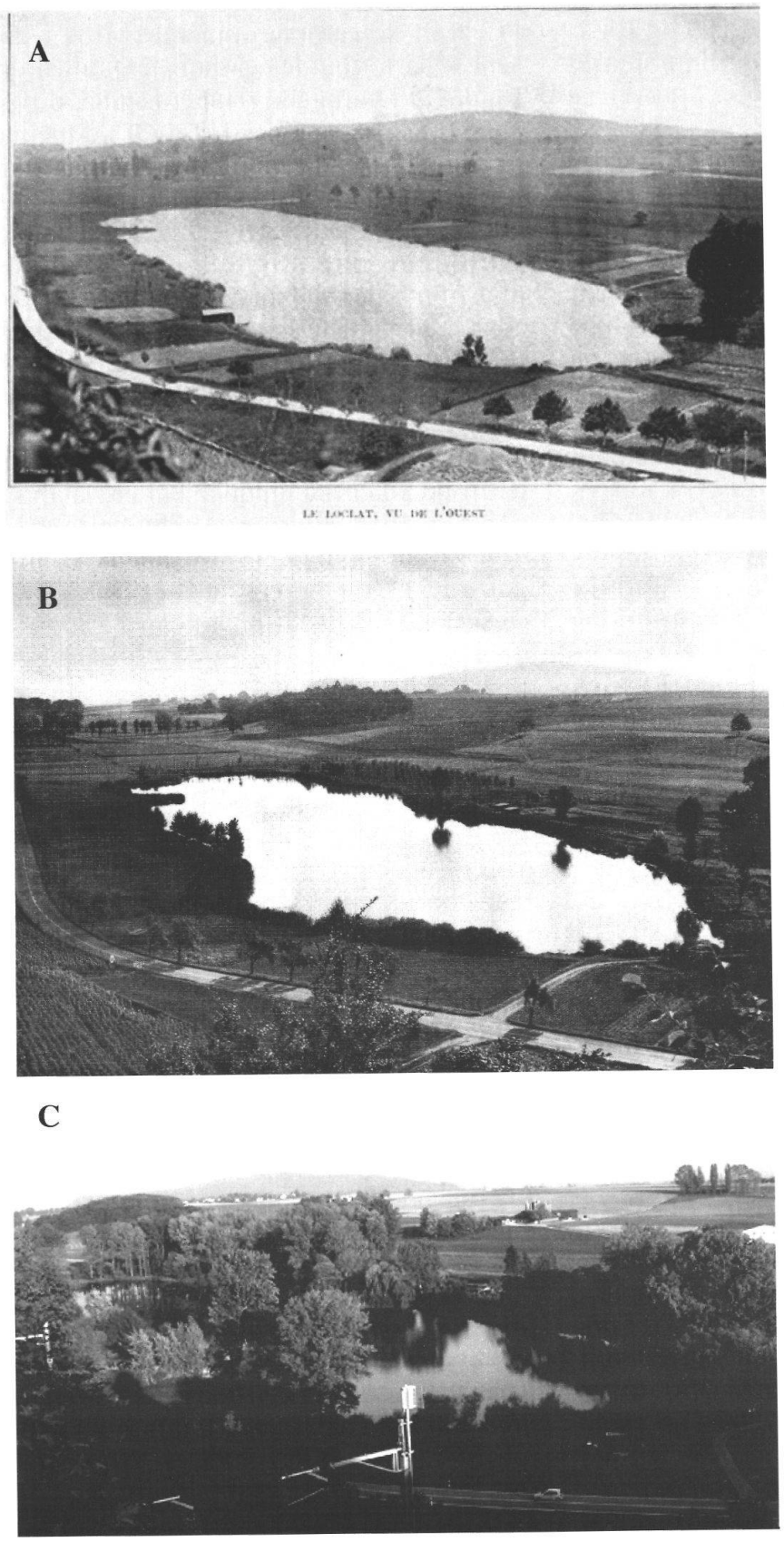


Figure 1: Photos du Loclat. En haut: au début du siècle passé (AMIS DE LA NATURE, 1908); au milieu: début des années 1960 (BAER *et al.*, 1962); en bas: en automne 2003 (photo V. Matera).

pour les phyllosilicates et ne dépasse pas les 3 % pour les minéraux en grains. Les données sont exprimées sous forme de rapport de pics (en CPS) dans le but de s'affranchir des erreurs liées à la préparation des échantillons. Les rapports de pics utilisés ici (fig. 9) sont le rapport calcite/quartz+feldspaths (plagioclase et feldspath potassique) pour la roche totale et le rapport kaolinite+smectite/ mica +chlorite.

Si l'on compare les teneurs en calcite calculées à partir du MINC, on constate que la méthode RX - cette dernière étant calibrée pour des roches carbonatées bien cristallisées - sous-estime souvent la proportion de calcite microcristalline présente dans les sédiments du lac. Toutefois, les tendances observées restent fiables.

Analyses des métaux, métaux lourds et métalloïdes (ICP-MS)

Les teneurs en métaux lourds et métalloïdes ont été déterminés dans 27 échantillons de sédiments répartis sur l'ensemble de la carotte LO-1. Les échantillons ont été mis en solution par une digestion assistée par micro-onde, le protocole de digestion étant basé sur la norme 3051 de l'EPA. La solubilisation de 0.25 g de sédiments (échantillon préalablement séché et broyé) est assurée par addition de 10 mL d'HNO_3 concentré de qualité suprapure associée à chauffage micro-onde. Les analyses élémentaires des extraits issus de la digestion ont été effectuées par couplage ICP-MS (Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry ; Elan 6100, Perkin-Elmer Instruments).

Les limites de détection de cette méthode vont de 0.2 µg/kg de sédiments pour le cobalt à 2400 µg/kg de sédiments pour le fer.

RÉSULTATS

Lithologie

Les sédiments constituant les deux carottes courtes prélevées dans la présente étude sont composés de :

• "limons noirs": ces limons sont situés entre l'interface eau/sédiment et une profondeur de ca. 40 cm. Il s'agit de limons carbonatés (calcite micritique), de couleur brun/noir, laminés et riches en matière organique.

La teneur moyenne en matière organique (MO) de cette couche est proche de 8 % (estimée à partir de la relation suivante : MO = 2·TOC). La teneur moyenne en calcite est de 75 %, les 25 % restant étant constitués de silicates détritiques et de silice biogénique (diatomées).

• "limons gris": limons carbonatés (calcite micritique) de couleur gris-beige homogènes de ca. 40 à 70 cm de profondeur. La teneur moyenne en calcite dépasse les 90 % et celle en MO est proche de ca. 5.5 %.

• "limons gris-bruns": limons carbonatés de nouveau plus sombres (gris-brun), sans laminations visibles en dessous de ca. 70 cm. Cette partie est également très riche en carbonates (90 %) mais de nouveau plus riche en MO (ca. 8%).

Dans la carotte LO-3 la présence de matériel tourbeux a été mise en évidence à une profondeur de 33 cm et une couche particulièrement bien laminée a été observée entre 20 et 24 cm. La figure 2 présente les teneurs en carbone organique et inorganique ainsi que les schémas descriptifs des carottes.

Datation

La datation des sédiments est basée sur une étude effectuée sur une carotte prélevée en 1995 sur ce même lac (Loclat short core SLB; M. Rolli, résultats non-publié). Le Cs-137 ayant été analysé dans les échantillons de la partie supérieure de cette carotte, cet élément radioactif permet

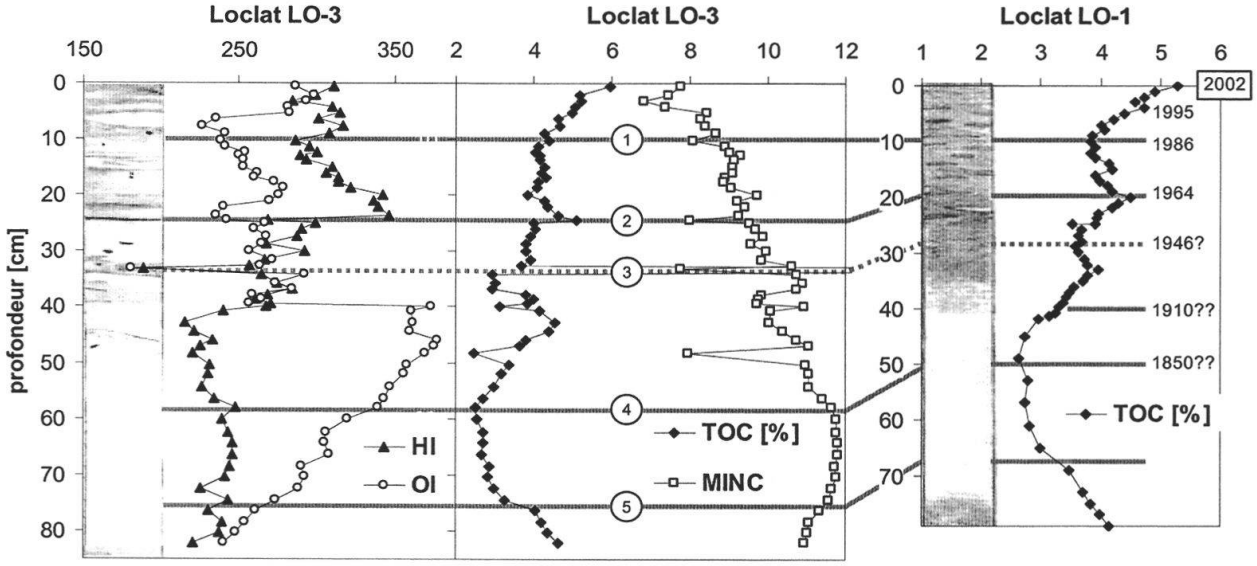


Figure 2: Données Rock-Eval : pour la carotte LO-3: indices d'oxygène (OI en mg CO_2 par g de TOC), indice d'hydrogène HI (en mg HC/ g TOC), carbone organique total TOC, et carbone minéral MINC. La corrélation entre les carottes LO-3 et LO1 est indiqué par les lignes 1 à 5, cette corrélation étant basée sur les courbes du TOC.

de dater les sédiments déposés lors des essais nucléaires de 1964 ainsi que lors de l'accident de Tchernobyl en 1986. Des analyses de TOC ont également été effectuées sur cette même carotte (fig. 3, M. ROLLI, résultats non publiés). La figure 3 montre que le maximum de Cs-137 datant de l'épisode de 1964 se situe à 16 cm de profondeur, maximum qui est bien corrélé avec le pic en TOC. Le maximum "1986" est localisé à 6 cm de profondeur. Par analogie, on estime alors que, pour la carotte LO-1, le niveau "1964" se situe à 20 cm (pic de TOC, fig. 2). De plus, en supposant que le taux de sédimentation est identique dans ces deux carottes pour cette période, les sédiments situés à une profondeur de 10 cm (LO-1) appartiennent au niveau "1986" et l'année 1995 (correspondant à la surface de la carotte SLB) correspond à une profondeur de 4 cm (fig. 2). On obtient donc des taux de sédimentation proches de 0.6 cm/an après 1986 et de 0.45 cm /an entre 1964 et 1986.

Il est, en effet, plausible de supposer un taux de sédimentation plus ou moins constant de 0.45 cm/an jusqu'à une profondeur de ca. 40 cm, car la lithologie change relativement peu. Se basant sur cette hypothèse, l'année 1946 correspondrait à une profondeur de 28 cm (niveau 3 dans figure 2) et l'année 1910 à la limite entre "limons noirs" et "limons gris" à 40 cm (niveau 4 dans la figure 2). L'année ainsi obtenue pour le "niveau 3" (fig. 2) est très proche de 1943. Il semble donc très probable que la présence de tourbe dans la carotte LO-3, à la profondeur correspondante, soit liée à l'installation des drains durant cette période mais également aux "effondrements qui se sont produits sur la rive nord du lac, zone, où la couche de tourbe est plus épaisse" (BAER *et al.*, 1962).

En dessous de 40 cm, le passage des "limons noirs"- riches en matière organique et en minéraux détritiques - aux "limons gris" (calcites micritiques assez purs) implique probablement un changement du taux de sédimentation. Etant donné que l'apport détritique et la productivité sont très probablement moins impor-

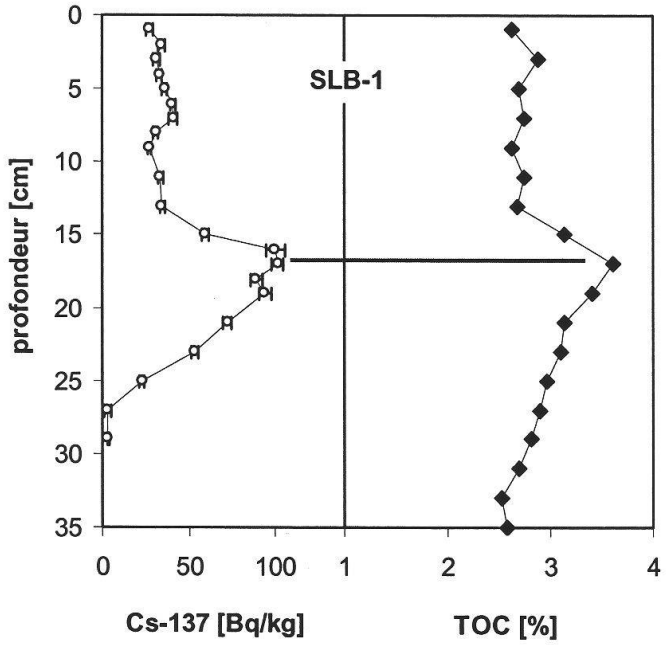


Figure 3: Activité du Cs-137 dans la carotte SLB-1 prélevée en 1995 (mesuré à l'Institut Forel, Université de Genève, par spectrométrie gamma). Les deux pics à 6 et 16 cm correspondent aux années 1986 et 1964.

tants dans les "limons gris" que dans les couches supérieures, on suppose un taux de sédimentation moins élevé pour les "limons gris". Les teneurs en plomb permettent également d'estimer l'âge des couches inférieures, car l'apport du plomb atmosphérique commence à augmenter de façon très importante au milieu du 19e siècle (SHOTYK *et al.*, 1998). Dans la carotte LO-1, une augmentation des teneurs en plomb est observée à des profondeurs comprises entre 55 et 45 cm (fig. 7). Si l'on place l'année 1850 à une profondeur de 50 cm (fig. 2), il en résulte un taux de sédimentation pour les limons gris de 0.16 cm/an (taux calculé pour la tranche comprise entre 40 et 50 cm).

Matière organique et carbonates authigènes

Les variations du taux de carbone organique mesuré dans les carottes LO-1 et LO-3 sont très similaires, ce qui nous permet de les utiliser afin de corréler les différents niveaux des deux carottes (voir fig. 2). Depuis le haut vers le bas, les niveaux corrélables (marqués de 1 à 5 sur la figure 2) sont :

1) la base de la zone de la forte diminution des valeurs du TOC depuis le haut,

2) pic très marqué en TOC dans la partie centrale des "limons noirs",

3) ce niveau correspond à la présence de la tourbe dans la carotte LO-3. La corrélation de ce niveau dans la carotte LO-1 est effectuée à partir du positionnement du niveau 2 en appliquant un taux de sédimentation réduit observé dans cette carotte relativement à LO-3. La détermination de ce niveau est également issue de la courbe générale du comportement du TOC dans ces deux carottes,

4) minimum du TOC dans les "limons gris",

5) augmentation marquée du TOC à la base des "limons gris".

Dans les 25 premiers cm de sédiment des valeurs élevées de l'HI combinées avec de faibles valeurs de l'OI indiquent une dominance de matière organique de type autochtone (type "phytoplancton"). Entre 25 et 40 cm, les valeurs plus faibles en HI indiquent un mélange de MO autochtone avec de la MO détritique et/ou dégradée. Les valeurs très faibles des deux

indices vers 33 cm confirment la présence de tourbe (la valeur du TOC pour cet échantillon est de 23.5 %). En dessous de 40 cm, les valeurs élevées de l'OI associées à des faibles valeurs en HI indiquent une dominance de la MO détritique et/ou fortement dégradée. A la base de la carotte, la MO est de nouveau constituée d'un mélange présentant une composante "détritique/ dégradée" plus exprimée que dans la zone comprise entre 25 et 40 cm.

Le niveau 2 correspond à la base de la couche nettement laminée dans la carotte LO-3. La MO dans cette couche est caractérisée par un HI particulièrement élevé et un OI faible (fig. 2); ceci est la signature de la matière organique de type "phytoplanctonique" (voir STEINMANN *et al.*, 2003). On observe le même signal HI-OI pour la couche correspondant à ce niveau dans la carotte LO-1, confirmant ainsi la corrélation supposée. Cette signature HI-OI se trouve également dans les couches au-dessus du niveau 1 dans les deux carottes.

Deux des principaux types de lithologie observés dans les carottes sont comparées dans la planche I. Sur cette planche, les images 1 et 2 correspondent aux limons carbonatés brun/noir laminés comportant 8-10 % de MO (de type "phytoplancton"); les images 3 et 4 correspondent aux limons carbonatés gris, homogènes avec environ 5 % de MO (de type plutôt "détritique/ dégradé"). Les lamines riches en matière organique sont caractérisées par une abondance de diatomées (planche I. 2). On note également une augmentation de la taille de la calcite authigène dans les couches les plus riches en MO déposée pendant une période de productivité élevée (voir planche I. 2 en rapport à l'image 4). Ce phénomène est souvent observé dans les milieux lacustres (p. ex. LAMBERT, 1999).

Minéralogie

Roche totale: les minéraux identifiés sont, par ordre d'abondance décroissante, (fig. 4) :

- la calcite, (7-100%),
- les phyllosilicates (0-15%),
- le quartz (0.2-6%),
- le plagioclase (0-1%),
- le feldspath potassique, (0-1%),
- la pyrite (en traces).

L'analyse de la roche totale permet de subdiviser la carotte LO-1 en deux parties bien distinctes qui, par ailleurs, coïncident bien avec les changements lithologiques observés:

- une partie inférieure (40-70 cm) de la carotte constituée de limons gris, dans laquelle la calcite est dominante au détriment des minéraux détritiques tels que quartz, feldspaths et phyllosilicates.
- une partie supérieure (0-40 cm) constituée de limons brun-noirs, où la calcite montre une nette diminution au profit des phyllosilicates, du quartz et, dans une moindre mesure, des plagioclases.

Les indosés augmentent également nettement dans la partie supérieure de la carotte. Ces derniers correspondent probablement à la matière organique et au quartz amorphe (diatomées).

Minéraux argileux (<2μm) : Les phyllosilicates identifiés dans cette fraction sont, par ordre d'abondance décroissante: (fig. 5):

- le mica (29-51%),
- la kaolinite (2-37%),
- la chlorite (0-35%),
- la smectite (0-35%),
- les interstratifiés irréguliers de type illite-smectites (IS, 0-19%) dont le taux de gonflants (smectites) ne dépassent pas les 15% (MOORE & REYNOLDS, 1987).

Comme dans le cas de la roche totale, l'analyse de minéraux de la fraction argileuse permet de séparer la carotte LO-1 en deux parties distinctes, coïncidant avec le changement lithologique observé vers 40 cm. La partie inférieure de la carotte (40-80 cm) est, en effet, caractérisée par un assemblage dominé par la smectite et la kaolinite, au détriment de la chlorite et, dans une moindre

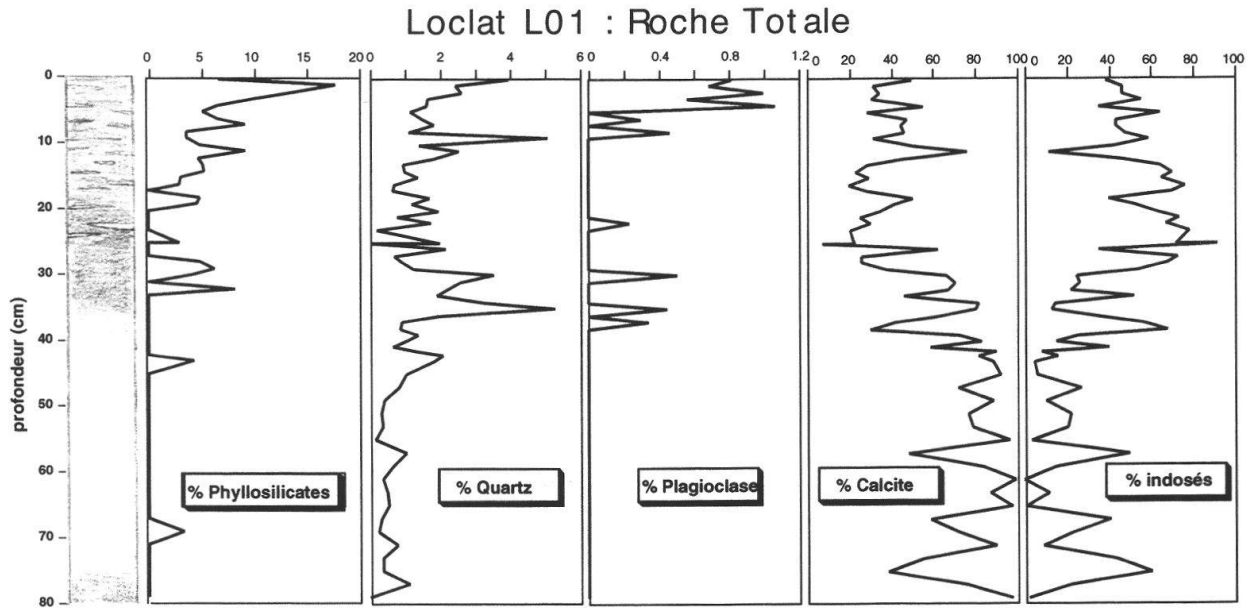


Figure 4: Carotte LO-1, distribution des teneurs des minéraux de la roche totale (dosage semi-quantitatif) exprimés en %. La partie inférieure de la carotte est dominée par la calcite, alors que le quartz, les phyllosilicates, le plagioclase et les indosés montrent des teneurs plus élevées dans la partie supérieure de la carotte (0-40cm).

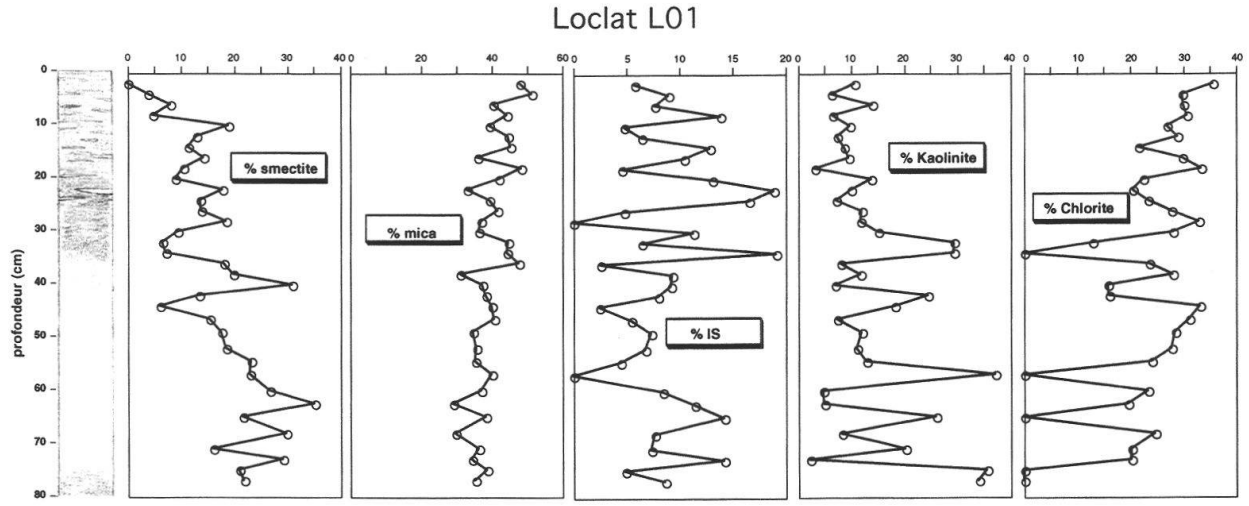


Figure 5: Carotte LO-1, distribution des phyllosilicates identifiés dans la fraction <2µm exprimés en pourcentages relatifs. La partie inférieure de la carotte est caractérisée par un assemblage au sein duquel la kaolinite et la smectite sont très abondantes, alors que mica et chlorite deviennent dominants dans la partie supérieure de la carotte.

mesure, du mica. Cette tendance s'inverse dans la partie supérieure de la carotte.

Distribution des métaux et métalloïdes

Les teneurs moyennes des métaux et métalloïdes dans les sédiments sont synthétisées dans le tableau 1. Parmi les 15 éléments analysés, le calcium est l'élément le plus fortement concentré suivi du fer et du magnésium.

Concernant les métaux lourds, on note que le zinc présente également des teneurs importantes pouvant atteindre 315 ppm

Elément	Concentration moyenne ± σ	(gamme de concentration)
Ca	311974 ± 38567	(232341 - 380246)
Fe	7790 ± 4246	(2685 - 20089)
Mg	3340 ± 990	(2092 - 6490)
Sr	338 ± 29.1	(300 - 391)
Mn	247 ± 50.5	(155 - 338)
Zn	130 ± 97.6	(<dl (*) - 315)
Ba	86.7 ± 30.3	(43.9 - 155)
Pb	27.6 ± 18.9	(<dl - 69.5)
Ni	18.4 ± 10.5	(5.2 - 47.6)
Cu	18.3 ± 14.2	(<dl - 44.6)
Cr	14.0 ± 11.7	(0.6 - 50.1)
As	4.6 ± 2.9	(0.9 - 10.9)
Co	3.2 ± 1.6	(1.1 - 7.5)
Mo	2.0 ± 2.2	(0.1 - 9.5)
Cd	0.4 ± 0.5	(<dl - 1.4)

Tableau 1: Teneurs (en mg kg^{-1} poids sec) en métaux et métalloïdes des sédiments
(*) < dl : teneurs inférieures aux limites de détection

(fig. 6) et ce, essentiellement dans la partie supérieure de la carotte. Le plomb et le cuivre présentent une distribution proche de celle du zinc (fig. 7).

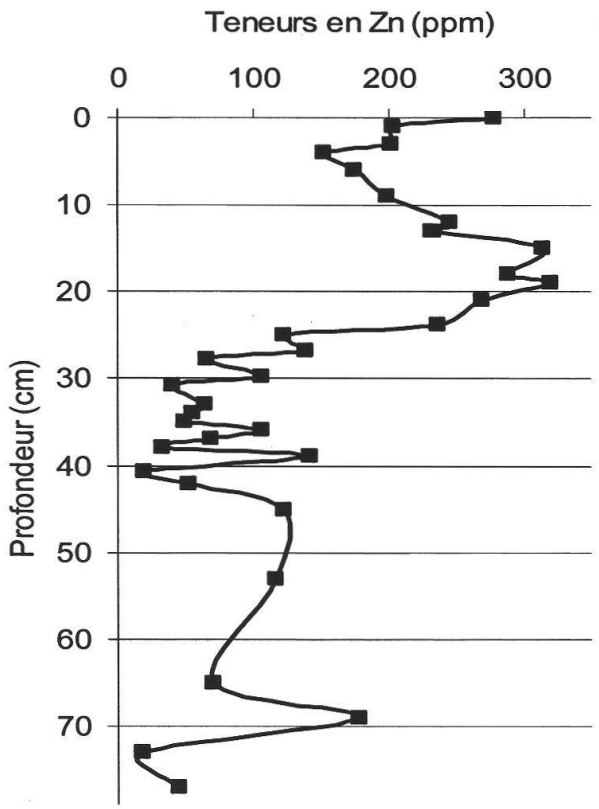
Concernant le comportement des autres éléments présents dans des moindres teneurs, on notera une répartition identique du Co, Cr et Ni (fig. 8) le long de la carotte. On constatera également une augmentation régulière des ces trois éléments dans les sédiments au-dessus de 50 cm (ca. 1850) avec une accélération du dépôt de ces éléments dans les derniers cm de sédiment (après ca. 1993). On remarquera que la répartition de ces trois éléments épouse remarquablement bien celle du TOC (fig. 2) ainsi que celle des minéraux détritiques (fig. 4). Ainsi on peut soit envisager (i) une éventuelle association de ces éléments avec la matière organique par des processus d'adsorption, soit (ii), ce qui semble le plus probable étant donnée le contexte minéralogique et environnemental, une association de ces éléments avec du matériel détritique (matériel molassique).

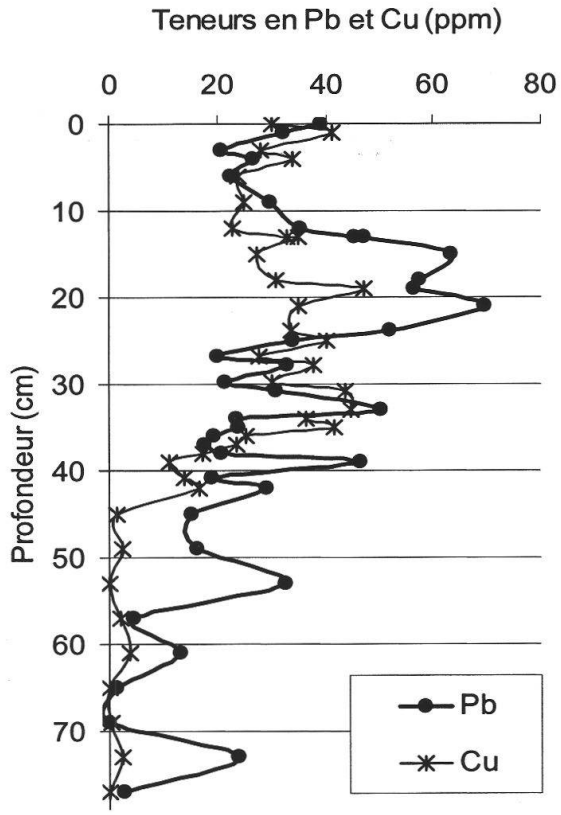
DISCUSSION

Origine des sédiments

Les assemblages minéralogiques qui caractérisent les formations géologiques avoisinant le Loclat permettent de distinguer facilement l'influence des séries mésozoïques jurassiennes (au nord), de la molasse et des dépôts morainiques (au sud). Les séries crétacées sont caractérisées par la kaolinite et la smectite qui sont beaucoup plus abondantes par rapport à la chlorite et au mica (ADATTE *et al.*, 1991, ATTEIA *et al.*, 1998). Par contre, la kaolinite est absente dans les sédiments molassiques et morainiques qui sont détritiques et par conséquent contiennent de grandes quantités de quartz et de feldspaths; les minéraux argileux les plus abondants étant la chlorite et le mica (ADATTE *et al.*, 1991, MONBARON, 1973, MONNIER, 1982).

Les rapports calcite/minéraux détritiques et kaolinite+smectite/mica+chlorite illustrent parfaitement le changement observé vers 40 cm (fig. 9). La partie inférieure de la carotte présente un spectre minéralogique typique des séries mésozoïques jurassiennes qui sont le plus souvent calcaires et appauvries en minéraux détritiques tels le quartz, feldspaths-K et plagioclases. Cet assemblage minéralogique reflète donc un apport des séries jurassiennes dominant jusque vers 1910. Au-dessus, les assemblages minéralogiques deviennent plus détritiques (augmentation du quartz, des phyllosilicates et du plagio-





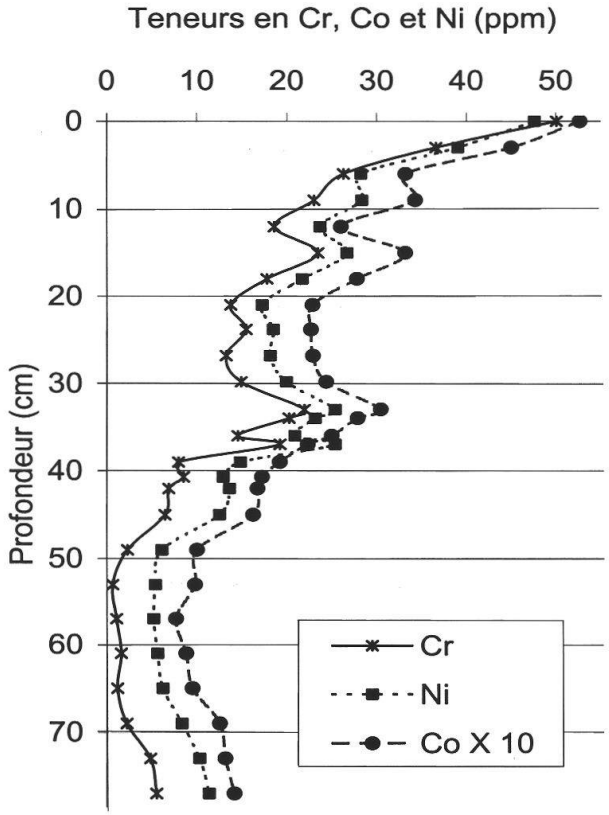


Figure 6: Distribution du Zn (mg kg^{-1}) dans la carotte LO-1.

Figure 7: Distribution du Pb et du Cu (mg kg^{-1}) dans la carotte LO-1.

Figure 8: Distribution du Cr, Co (conc. x 10) et Ni (en mg kg^{-1}) dans la carotte LO-1.

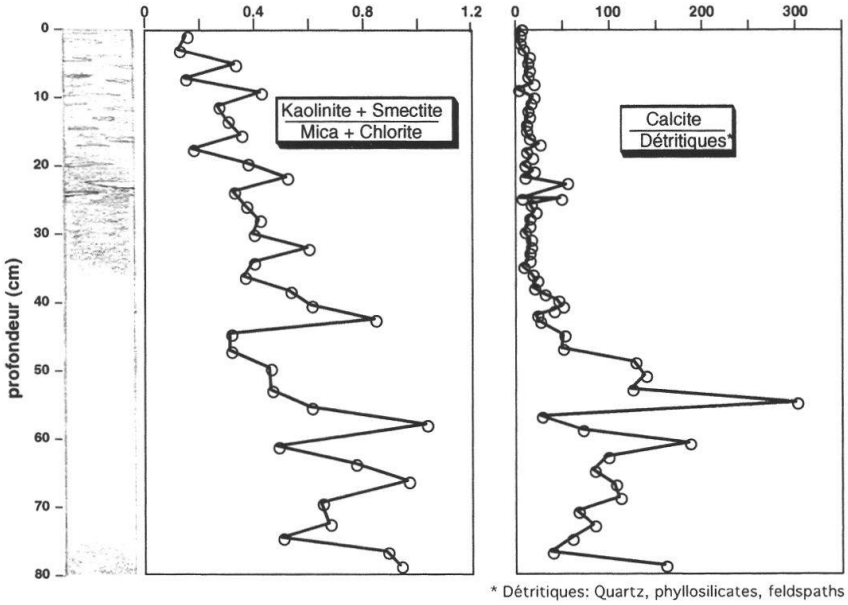


Figure 9: Carotte LO-1, distribution des rapports (exprimés en coups par seconde) calcite/minéraux détritiques et kaolinite+smectite/mica+chlorite. Une inversion des tendances est observée dans l'intervalle 40-50cm.

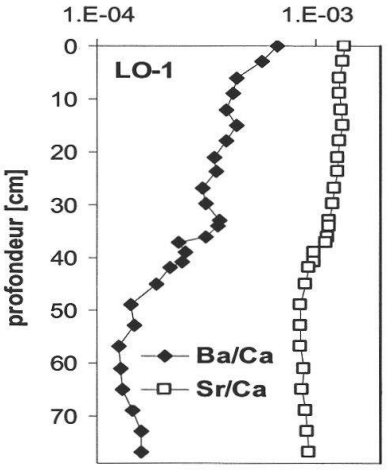


Figure 10: Rapports Ba/Ca et Sr/Ca [g/g] des échantillons de la carotte LO-1 (échelle logarithmique).

clase) et les apports de mica et de chlorite deviennent progressivement prépondérants. Le plagioclase devient systématiquement présent dans les derniers 10 cm de sédiments.

Le changement de la composition minéralogique observé vers 40 cm indique donc une modification de la source qui principalement "jurassienne" dans la partie inférieure de la carotte devient "molassique et/ou morainique" dans la partie supérieure de la carotte. Nos datations placent ce changement de l'origine des apports vers 1910. Ceci pourrait s'expliquer par une modification du drainage et une exploitation agricole plus intensive du côté sud du lac, impliquant une érosion prépondérante des sédiments molassiques et quaternaires.

Développement de la productivité et de la précipitation de la calcite

Le fait que les valeurs de TOC aient doublé durant le siècle dernier indique-t-il nécessairement une augmentation de la productivité du même ordre de grandeur ? Rappelons que le taux de carbone organique dans les sédiments dépend de la productivité primaire et de la préservation de la matière organique. La productivité est surtout liée à la quantité des nutriments à disposition, alors que la préservation est déterminée par des facteurs tels que le taux de sédimentation ou la disponibilité des oxydants (principalement l'oxygène ainsi que, dans une moindre mesure, les sulfates) présents à la fois dans la colonne d'eau et à l'interface eaux/sédiments.

Afin de mieux cerner cette question, nous avons calculé les taux d'accumulation de la MO à partir du modèle de datation de la fig. 2 et de la porosité de chaque échantillon. Ce flux de carbone organique montre la même tendance que le TOC et augmente régulièrement au cours du temps: 62 g C m^{-2} a^{-1} avant 1910; 97 g C m^{-2} a^{-1} de 1910-1946; 114 g C m^{-2} a^{-1} de 1946-1964; 127 g C m^{-2} a^{-1} de 1964-1986; 200 g C m^{-2} a^{-1} de 1986-1995; et 218 g C m^{-2} a^{-1} de 1995-2002. On constate ainsi que le flux du carbone organique a triplé pendant cette

période, la magnitude de l'enfouissement du carbone organique dans les sédiments étant remarquable. Un troisième argument qui appuie une augmentation de la productivité réside dans le rapport Ba/Ca (fig. 10). Cet indicateur géochimique est souvent utilisé dans les milieux marins où une corrélation entre le flux de la matière organique et la précipitation de barityne authigène est connu (GINGELE *et al.*, 1999). Pour ce rapport on observe également une augmentation d'un facteur de ca. 3. Le comportement du Ba est probablement également influencé par d'autres facteurs, comme la dissolution de la barityne dans le milieu anoxique ou des variations de l'apport du Ba (voir explication du Sr ci-dessous).

Globalement, les données présentées témoignent d'une forte augmentation de la productivité au cours des 100 dernières années. La principale raison de cette évolution est certainement l'augmentation de l'apport de nutriments lié aux activités anthropiques. L'installation des stations d'épuration dans les années 60 est probablement responsable de la stabilisation des valeurs du TOC entre ca. 20 et 10 cm de profondeur.

La teneur en calcite authigène (courbe du MINC, fig. 2) est relativement inverse à celles du TOC. Ceci est en partie dû à une dilution par la matière organique et – surtout pour la partie haute de la carotte – par la silice biogénique ainsi que les minéraux détritiques tels que le quartz, les phyllosilicates et le plagioclase. Concernant la carotte LO-3, le taux d'accumulation de la calcite authigène montre une légère augmentation entre 1910 et 1964: de 340 g C m^{-2} a^{-1} à 430 g C m^{-2} a^{-1}. Ce taux reste constant jusqu'en 1995 mais est plus faible (300 g C m^{-2} a^{-1}) dans les sédiments les plus récents. Pour la carotte LO-1, où valeurs du MINC ne sont disponibles que pour la partie supérieure, on calcule également une diminution du flux de la calcite authigène dans les couches post-1995. La tendance générale d'une augmentation de la précipitation de la calcite est probablement une conséquence de l'augmentation de la productivité: pendant les blooms le phytoplancton absorbe du CO_2 et augmente ainsi le pH ce qui favorise la précipitation de la calcite. Les diamètres importants des grains de calcite dans les sédiments supérieurs (voir planche I) corroborent une productivité plus élevée.

L'augmentation du rapport Sr/Ca (fig. 10) pourrait également être liée à un changement des processus et de la cinétique de la précipitation de la calcite (plus la calcite est cristallisée moins le Sr est susceptible de se substituer). Cependant, une explication plus plausible pour les changements du rapport Sr/Ca serait une augmentation de l'apport du Sr dans le lac. Comme le démontrent les analyses minéralogiques, les apports provenant du sud (molasse/moraines) deviennent dominants dans la partie supérieure de la carotte. Si l'on compare les teneurs en Sr et le rapport Sr/Ca on constate qu'ils sont clairement plus élevés dans les moraines par rapport aux roches calcaires du Jura (RUCH, 2001).

Hormis les nutriments, le climat a-t-il une influence importante sur le taux de MO des sédiments et sur la formation de la calcite? Le climat de l'hémisphère du nord est caractérisé par une période particulièrement froide entre ca. 1840 et 1910, suivi par un réchauffement de presque 0.4 °C entre 1910 et 1940 (IPCC, 2001). L'évolution des températures (moyennes annuelles) à Neuchâtel est résumée dans le tableau 2.

Période	Température
1901-1919	8.9 °C
1920-1938	9.3 °C
1939-1942	8.6 °C
1943-1953	9.9 °C
1954-1987	9.4 °C
1988-2002	10.4 °C

Tableau 2: Evolution des températures moyennes annuelles à Neuchâtel (d'après les données de l'Observatoire cantonal de Neuchâtel, J. Baniewicz).

Selon les datations mentionnées dans la figure 2, la période de réchauffement qui débute en 1910 correspond bien à l'augmentation du TOC observée à la transition "limons gris"/"limons noirs". Les années froides durant la période 1939 et 1942 pourraient correspondre à la diminution du TOC au-dessus du pic à 33 cm (fig. 2, LO-1). A partir de 1943, une période relativement chaude a probablement contribué au changement radical de la signature Rock-Eval de la matière organique déposée.

Quant à la période froide de 1840-1910, il est tentant de la corréler avec le niveau comportant les "limons gris" (relativement pauvres en MO), cependant par manque de dates fiables pour la datation du début du dépôt des "limons gris", cette corrélation reste trop incertaine.

Accumulation des métaux lourds

Le plomb (ainsi que le zinc) montre un enrichissement important à partir des années 1950 (env. 25 cm de profondeur) avec un pic dans les années 60 et 70 (entre 25 et 15 cm, fig. 7). Cette répartition est certainement liée à des sources anthropiques locales. Les concentrations du cuivre sont plus importantes dès les années 1920 (fig. 7). Au vu de la datation de la carotte LO-1, il apparaît particulièrement intéressant de suivre l'évolution du plomb au cours du temps, le plomb étant un élément particulièrement étudié dans les sédiments lacustres mais également dans les tourbières. L'étude des tourbes permet, en effet, d'enregistrer les dépôts atmosphériques des métaux. Lors d'une étude d'un profil de tourbe (Etang de la Gruère, ca. 25 km au nord du Loclat dans les Franches Montagnes, Jura) les flux de plomb atmosphérique ont été évalués par SHOTYK *et al.* (1998). Cette étude montre que les flux atmosphériques de plomb augmentent régulièrement depuis les années 1843 jusqu'aux années 1920 puis diminuent sensiblement jusqu'en 1936 avant de ré-augmenter de façon notable pour atteindre un pic en 1979 (certainement liée à la présence de plomb dans l'essence et à l'augmentation du trafic automobile). Les flux diminuent ensuite régulièrement jusqu'à l'échantillon le plus récent datant de 1991 (mise sur le marché de l'essence sans plomb au début des années 80).

On observe ainsi que de très fortes similitudes entre cet enregistrement et les variations des teneurs en Pb dans la carotte LO-1. On peut cependant associer à l'apport général du plomb atmosphérique, des éléments locaux comme le déversement des eaux usées dans les années 1955 à ca. 1960 (BAER *et al.*, 1962) et la mise en place de stations d'épuration (dès les années 60). On notera également une augmentation significative du Pb (ainsi que du Zn et Cu) lors des dernières années de sédimentation (dès ca. 1995).

Aux vues de l'ensemble des résultats sur les métaux obtenus dans cette étude, il semble que la répartition au sein de la carotte LO-1 soit liée à deux sources distinctes :

- un impact anthropique majeur lors des 60 dernières années pour le Zn, Pb, Cd. Ces sources sont certainement multiples et semblent essentiellement liées aux émissions atmosphériques (Pb), voire aux lessivages des chaussées (Pb, Zn, Cd).
- une influence marquée des sources molassiques dès 1943 lorsque des drains ont été mis en place. Ces modifications du système de drainage laissent une trace importante dans la géochimie des sédiments. Ceci est confirmé par la composition minéralogique, les teneurs importantes en Sr ainsi qu'un rapport Sr/Ca élevés. Ces sources ont certainement un impact majeur sur l'apport d'éléments tels que le Fe, Mg, Mn, Ba, Ni, Cr et le Co.

CONCLUSIONS

Les résultats des analyses effectuées sur deux carottes du lac du Loclat (Ne) mon-

trent la présence de trois lithologies distinctes:
• des limons carbonatés brun-noirs en surface (0-40), riches en matière organique (MO) type "phytoplancton" avec une fraction détritique de source "molassique et/ou morainique"
• des limons carbonatés gris-beige entre 40 et 70 cm, moins riches en MO (de type plutôt "détritique/dégradé") et avec une plus faible teneur en minéraux détritiques (de source "jurassienne" cette fois)
• des limons carbonatés gris-bruns à la base des carottes (70-80 cm), de nouveau plus riches en MO.

Plusieurs événements sont enregistrés dans les sédiments échantillonnés:
• la mise en place d'un système de drainage en 1943 (en témoigne la présence de tourbe dans la carotte LO-3)
• les essais nucléaires de 1964 (pic de Cs-137)
• l'accident de Tchernobyl en 1986 (deuxième pic de Cs-137)

Aux vues de l'évolution du lac on constate :
• une nette augmentation de la productivité lors du siècle dernier, certainement liée à l'apport de nutriments d'origine anthropique
• une répartition des métaux lourds fortement corrélée (i) aux activités anthropiques (émissions atmosphériques pour le plomb, mise en place de drains, mise en service de stations d'épuration) et (ii) également, et plus généralement en ce qui concerne les métaux, une répartition liée aux apports d'origine molassique.

REMERCIEMENTS

Nous remercions, pour leurs précieux renseignements, Joanna Baniewicz (Observatoire Cantonal), Jacques-Edouard Cuche, Berta Pokorni (SCPE), Marc Rolli et François Straub. Pour leur aide au sein du laboratoire, nos remerciements vont à Tiffany Monnier (analyses), André Villard (développeur d'un ingénieux système permettant d'indurer ces sédiments " boueux " pour la préparation des lames minces) et Mohammad-Mehdi Dadras (images ESEM). Sont également associés à ces travaux, Jérôme, Caterina, Saskia, Mirko qui ont échantillonné et décrit des carottes supplémentaires prélevées dans ce même lac. Nous n'oublierons pas de remercier le laboratoire de microbiologie de l'université (LAMUN) qui a mis son bateau à notre disposition.

BIBLIOGRAPHIE

ADATTE, T.; RENTZEL, PH. & KÜBLER B. 1991. Etude minéralogique et sédimentologique du remplissage karstique de la grotte de Cotencher (Jura Neuchâtelois Suisse). *Eclogae geol. Helv.* 84/3 : 661-671.

ADATTE, T.; STINNESBECK, W. & KELLER, G. 1996. Lithostratigraphic and mineralogic correlations of near KT boundary clastic sediments in northeastern Mexico: Implications for origin and nature of deposition. *Geological Society of America. Special Paper* 307 : 211-226.

ATTEIA O.; PERRET, D.; ADATTE, T.; KOZEL, R. & ROSSI, P. 1998. Caracterization of natural colloids from a river and spring in a karstic basin. *Environmental Geology* 314 : 257-269.

BAER, J. G.; CLOTTU, O.; ZWEIACKER, C. 1962. Saint-Blaise au bord de l'eau. *Commission du 3 février Saint-Blaise.*

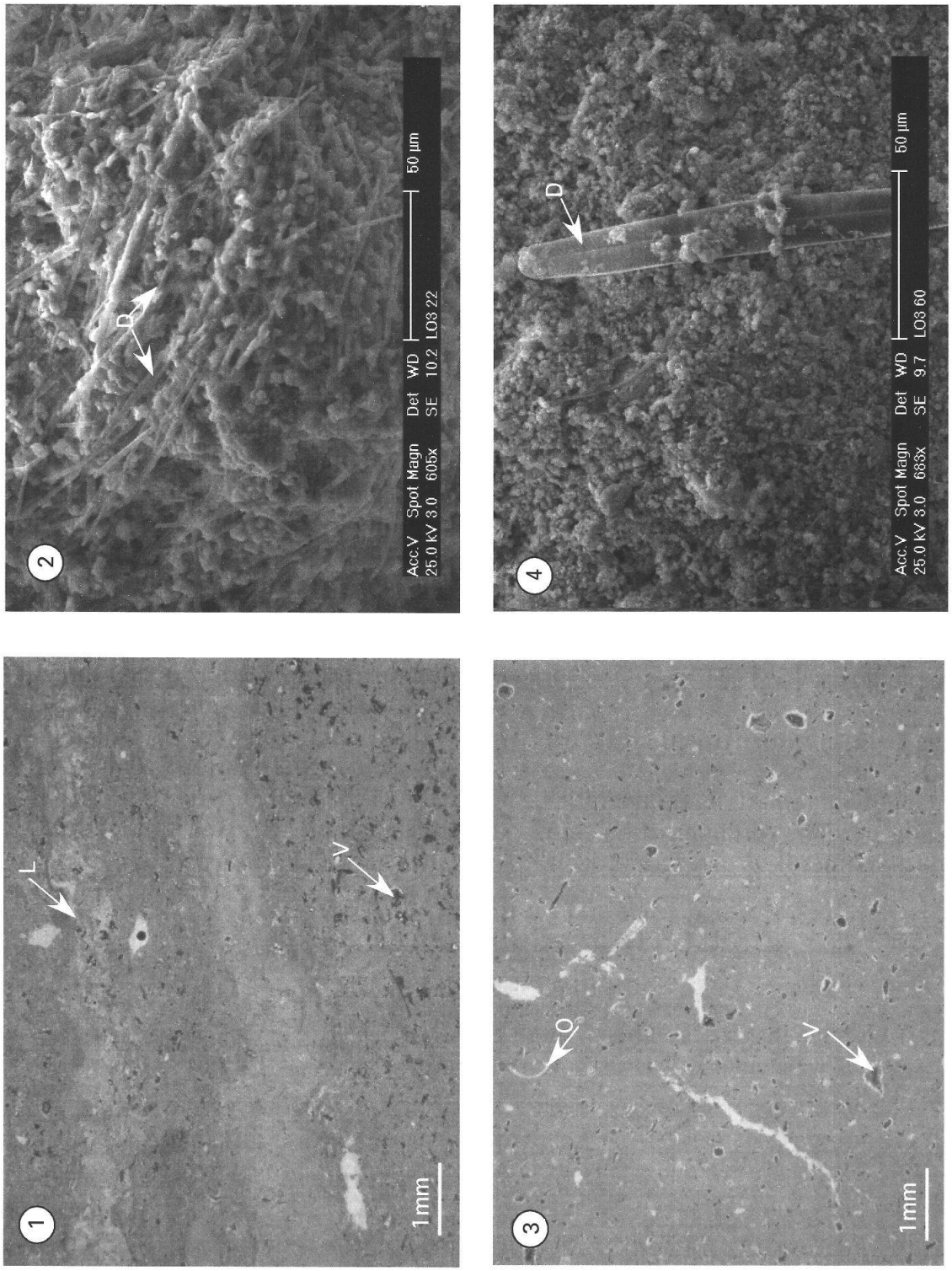


Planche I: Microfaciès (lames minces) (à gauche) et photos ESEM correspondantes. **1 et 2**: échantillon prélevé à 22 cm (carotte LO-3). Présence de laminations (L) constituées de calcite relativement grossière, de fragments de végétaux (V) et d'abondantes diatomées (D). **3 et 4**: échantillon prélevé à 60 cm (carotte LO-3) constitué d'ostracodes (O), de fragments de végétaux (V) flottant dans une matrice micritique non laminée (**3**) constituée par une calcite très fine et de rares diatomées (D).

CLUB DES AMIS DE LA NATURE (Neuchâtel) 1907. Le lac de Saint-Blaise : histoire, hydrographie, faune des invertébrés / par le Club des amis de la nature de Neuchâtel. *Bulletin de la Société neuchâteloise de géographie* 18 : 5-46.

CONRAD, R.; ARAGNO, M. & SEILER, W. 1983. Production and consumption of carbon monoxide in a eutrophic lake. *Limnol. Oceanogr.* 28 : 42-49.

GINGELE, F.X.; ZABEL, M.; KASTEN, S.; BONN, W.J. & NÜRNBERG, C.C. 1999. Biogenic Barium as proxy for paleoproductivity: Methods and limitations of applications. In Fisher G. and Wefer G. (Ads.) Use of proxies in Paleoceanography : examples from South Atlantic. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 345-364.

HADORN, Ph. 1994. Palynologie d'un site néolithique et histoire de la végétation des derniers 16000 ans. *Archéologie Neuchâteloise* 18 : 1-96.

KELTS, K.; BRIEGEL, U.; GHILARDI, K. & HSÜ, K. 1986. The limnogeology-ETH coring system. *Schweiz. Z. Hydrol.* 48 : 105-115.

KÜBLER, B. 1987. Cristallinité de l'illite, méthodes normalisées de préparations, méthodes normalisées de mesures. *Cahiers Institut de Géologie, Neuchâtel, Suisse,* Série ADX 2 : 2-5.

IPCC 2001. Third Assessment Report - Climate Change 2001; The Scientific Basis. *Intergovernmental Panel on Climate Change.*

LAMBERT, P. 1999. La sédimentation dans le Lac de Neuchâtel (Suisse): processus actuels et reconstitution paléoenvironnementale de 1500 BP à nos jours. *Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel*, Suisse.

MONBARON, M. 1973. Etude roentgénographique d'une moraine de fond (Valangin, NE). *Bull. Soc. neuchâtel. Sci. nat.* 96 : 123-134.

MONNIER, F. 1982. Thermal diagenesis in the swiss Molasse basin: implication for oil generation. *Canad. J. Earth Sci.* 19 : 328-342.

MOORE, D. & REYNOLDS, R. 1989. X-Ray-diffraction and the identification and analysis of clay-minerals. *Oxford University Press.*

ROLLI, M. & RUCH, P. 1994. Conzentratione di stronzio nei sedimenti lacustri: anomalie nei laghi Svizzeri. *Il Quaternario* 7 : 479-482.

RUCH, P. 2001. Comparaisons des signatures isotopiques, chimiques, minéralogiques et biologiques dans le Gerzensee (BE). *Rapport final PNR 31, vdf Zürich.*

RUMLEY, G. & ADATTE, T. 1983. Méthode rapide de séparation des fractions 2-16 et <2μm pour analyses par diffraction-X. *Cahiers Institut Géol. Neuchâtel, Suisse*, série A.G. 9 : 1-4.

SCHWEIZER, C. & ARAGNO, M. 1975. Etude des hydrogénobactéries dans un petit lac (le Loclat ou le Lac de Saint-Blaise). *Bull. Soc. neuchâtel. Sci. Nat.* 98 : 79-87.

SHOTYK, W.; WEISS, D.; APPLEBY, P.G.; CHEBURKIN, A.K.; FREI, R.; GLOOR, M.; KRAMERS, J.D.; REESE, S. & VAN DER KNAAP, W.O. 1998. History of atmospheric lead deposition since 12,370 C-14 yr BP from a peat bog, Jura Mountains, Switzerland. *Science* 281: 1635-1640.

STEINMANN, P.; ADATTE, T. & LAMBERT, P. 2003. Recent changes in sedimentary organic matter from lake Neuchâtel (Switzerland) as traced by Rock-Eval pyrolysis. *Eclogae geol. Helv.* 96 (Supplement 1) : S109-S116.