

# LA MATIÈRE ORGANIQUE DES ALTERNANCES SEL-MARNE DU SALAR D'UYUNI (ALTIPLANO, BOLIVIE) ÉTUDES GÉOCHIMIQUES ET PALYNOLOGIQUES

Monique SCHULER<sup>1</sup>, Marie-Madeleine BLANC-VALLERON<sup>2</sup> et François RISACHER<sup>3</sup>

RÉSUMÉ - Le sondage UA, au centre du salar d'Uyuni, a traversé une alternance de sédiments halitiques et « lacustres » sur plus de 120 m de profondeur. Diverses analyses, géochimiques, palynologiques, pétrographiques et minéralogiques, ont été effectuées afin d'étudier la matière organique présente. Cette MO est peu abondante (COT = 0,4 % en moyenne) par rapport à celle des alternances « sel-marne » d'autres séries. Le palynofaciès montre une grande richesse relative en algues planctoniques lacustres, bien que cette MO ne se comporte pas comme un type I : les paramètres de pyrolyse Rock-Eval la rapprochent d'une MO de type II (classiquement observée dans les faciès sapropéliques en domaine marin).

Matière organique, Palynofaciès, Géochimie, Evaporite, Quaternaire, Bolivie

The organic matter of the salt-marl alternating layers of the salar of Uyuni (Altiplano, Bolivia).  
Geochemical and palynological studies

ABSTRACT - The salar of Uyuni, in the central Bolivian Altiplano, is the largest salt pan in the world. The UA deep well sediments (121 m in depth) correspond to 12 salt crusts separated by 11 parting muds. Geochemical, palynological, petrographical and mineralogical studies have been performed to study the organic matter of the argillaceous facies interstratified with halite. OM is scarce (mean TOC = 0,4%), as compared to other salt-marl alternating layers. Palynofacies shows a large abundance of planktonic lacustrine algae ; but, from IH - IO parameters, OM is comparable to type II marine OM of planktonic origin rather than lacustrine type I OM.

Organic matter, Palynofacies, Geochemistry, Evaporite, Quaternary, Bolivia

## I - INTRODUCTION

L'Altiplano bolivien est un vaste bassin (200 000 km<sup>2</sup>), d'altitude élevée (3700 - 4500 m), compris entre deux chaînes de montagne, les Cordillères orientale et occidentale des Andes, qui culminent vers 7000 m (fig. 1). Des formations précambriennes et paléozoïques constituent le substratum de l'Altiplano. Elles sont recouvertes par de puissantes séries volcano-sédimentaires d'âges crétacé, tertiaire et quaternaire.

Au cours du Plio-Quaternaire, l'individualisation de tout un ensemble endoréique de bassins d'effondrement a permis l'établissement de lacs plus ou moins salés.

Le centre de l'Altiplano (à 3653 m d'altitude environ) est occupé par des salars (BALLIVAN et RISACHER, 1981) dont celui d'Uyuni qui correspond à la plus vaste étendue de sel connue au monde (10 000 km<sup>2</sup>) et dont la

<sup>1</sup> Centre de Géochimie de la Surface, CNRS, 1 rue Blessig, 67084 Strasbourg Cedex, France.

<sup>2</sup> UA 723, CNRS « Processus et Archives sédimentaires » et Laboratoire de Géologie du Museum national d'Histoire naturelle, 43 rue Buffon, 75005 Paris, France.

<sup>3</sup> ORSTOM, Mission Chili, Casilla 53390, Correo Central, Santiago 1, Chili.



croûte de sel superficielle atteint 11 m d'épaisseur (fig. 2) (RISACHER, 1978 ; RISACHER et FRITZ, 1991 ; RISACHER, 1992 a et b). La plus grande partie de ce sel provient du lessivage d'anciennes formations salifères (présence de nombreux diapirs de gypse sur l'Altiplano).

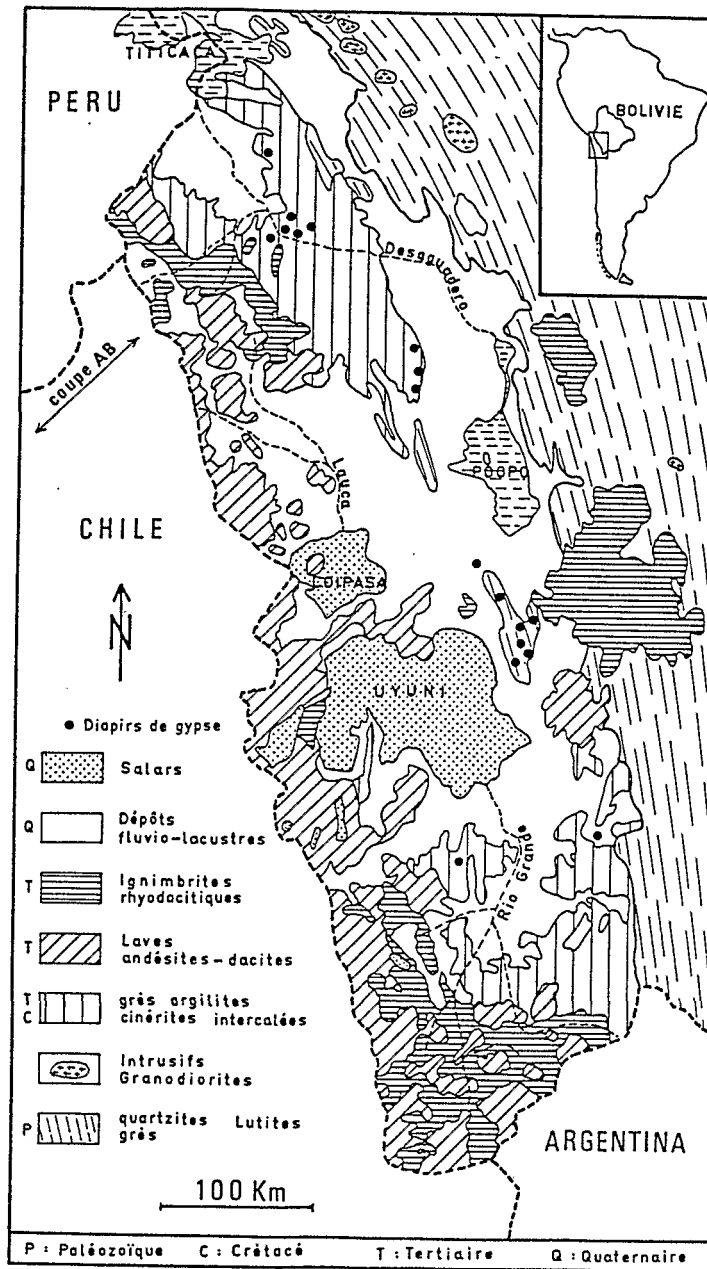


Fig. 1- Carte géologique de l'Altiplano bolivien (d'après RISACHER, 1992 b).  
Geologic map of the Bolivian Altiplano



Fig. 2- Localisation du sondage profond étudié dans le salar d'Uyuni. Les courbes indiquent l'épaisseur en mètres de la croûte de sel superficielle (d'après RISACHER et FRITZ, 1992 b). *Isopachs of Uyuni salt crust (in meters) with location of the UA well (from RISACHER et FRITZ, 1992 b)*

Dans la région d'Uyuni, trois transgressions lacustres majeures ont été mises en évidence : Escarra (non datée), Minchin (> 20 000 ans BP) et Tauca (10 000 à 15 000 ans BP) (SERVANT et FONTES, 1978). Les nouvelles données, publiées par SERVANT *et al.* (1995), permettent de préciser l'âge de la phase Tauca (12 000 - 15 000 ans) et de distinguer un événement lacustre nommé Coipasa (11 400 - 10 500 ans).

La croûte superficielle du salar d'Uyuni provient de l'assèchement, il y a moins de 10 000 ans, d'un immense lac salé : le lac Tauca ; l'aridité a dû alors être extrême (précipitations inférieures à 20 mm/an alors qu'elles sont comprises maintenant entre 100 et 300 mm/an) pendant au moins 2000 à 3000 ans (RISACHER et FRITZ, 1992). Plus au Nord, la phase d'aridité est datée : D. WIRRMANN et L.F. OLIVEIRA ALMEIDA (1987) ont montré que le niveau du lac Titicaca, entre 7700 - 3650 ans BP, se situait 50 m en dessous du niveau actuel.

Le sondage UA, réalisé en 1985-1986 par F. Risacher, est situé approximativement au centre salar d'Uyuni ; la croûte halitique superficielle et les sédiments sous-jacents ont été traversés jusqu'à 121,14 m de profondeur, sans atteindre les sédiments pré-évaporitiques. Ce sondage permet d'observer l'alternance de 12 niveaux halitiques (soit 82,24 m d'épaisseur cumulée, c'est-à-dire 2/3 des sédiments) et de 11 niveaux argileux lacustres ou fluviodeltaïques (soit 39 m d'épaisseur cumulée) (tabl. 1).

Les alternances « sel-argile » observées correspondent certainement à des variations climatiques majeures. Toutefois, en l'absence de datation absolue, il est difficile de corréler les « phases lacustres » avec celles connues par ailleurs dans l'Altiplano central.

L'objectif de cette étude est de caractériser la MO (matière organique) des sédiments du salar d'Uyuni, qui se situe dans un contexte morfo-structural et climatique (SERVANT et FONTES, 1978) différent de celui des lacs salins actuels (africains) pour lesquels on possède des données relatives à la matière organique.

Tabl. 1- Position et nature des échantillons étudiés dans le sondage UA. *Location and nature of samples studied from UA borehole*

niveau	épaisseur	nature des échantillons
1er niveau halitique (0 - 6 m)	6 m	3 échantillons de sel
1er niveau lacustre	0,5 m	1 échantillon argileux
2ème niveau halitique (6,5 - 8,2 m)	1,7 m	1 échantillon de sel
2ème niveau lacustre	6,1 m	1 éch. gypseux + 10 argileux
3ème niveau halitique (14,3 - 16,6 m)	2,3 m	1 échantillon de sel
3ème niveau lacustre	1,6 m	2 argileux + 1 sel argileux
4ème niveau halitique (18,2 - 22 m)	3,8 m	1 échantillon de sel
4ème niveau lacustre	13,4 m	20 échantillons argileux
5ème niveau halitique (35,4 - 41,5 m)	6,1 m	1 échantillon de sel
5ème niveau lacustre	5,2 m	4 échantillons argileux
<i>entre 42,5 et 46,2 m, épisode riche en cendres volcaniques avec faible taux de récupération du matériel carotté</i>		
6ème niveau halitique (46,7 - 53,5 m)	6,8 m	1 échantillon argileux
6ème niveau lacustre	3,6 m	6 échantillons argileux
7ème niveau halitique (57,1 - 61,9 m)	4,8 m	pas d'échantillon
7ème niveau lacustre	3,3 m	7 échantillons argileux
8ème niveau halitique (65,2 - 66,9 m)	1,7 m	pas d'échantillon
8ème niveau lacustre	1,5 m	2 échantillons argileux
9ème niveau halitique (68,4 - 72,4 m)	4 m	pas d'échantillon
9ème niveau lacustre	1,6 m	3 échantillons argileux
10ème niveau halitique (74 - 83,2 m)	9,2 m	pas d'échantillon
10ème niveau lacustre *	1,1 m	pas d'échantillon
11ème niveau halitique (84,3 - 105,2 m)	20,9 m	1 échantillon de sel
11ème niveau lacustre *	1,1 m	pas d'échantillon
12ème niveau halitique (106,3 - 121,24 m)	>14,94 m	pas d'échantillon

\* Les niveaux « lacustres » 10 et 11 seraient en réalité fluvio-deltaïques (couleur rouge du sédiment et absence de coprolithes d'*Artemia*).

## II - DESCRIPTION DU SONDAGE ET DES NIVEAUX ÉCHANTILLONNÉS

Les sédiments du sondage UA ont déjà fait l'objet : (1) de mesures de porosité, de dosages de la calcite, du détritique, de la halite et du gypse pour les 70 premiers mètres (F. RISACHER, *cf.* annexe a) ; (2) de dosage du carbone organique et de l'azote au CHN Carlo-Erba pour les 47 premiers mètres (ORSTOM Bondy, *cf.* annexe b).

Ces analyses montrent que : (1) les niveaux halitiques correspondent principalement à de la halite avec un peu de gypse et de détritique (dont de la magnétite dans la partie inférieure du profil) ; la matière organique est absente ou en traces seulement ; (2) les niveaux lacustres correspondent principalement à du matériel détritique,

du gypse microcristallin et de la calcite ; la matière organique est présente, mais en quantité relativement faible (< 2 %).

Des échantillons complémentaires ont été prélevés : 56 sont « argileux »\*, (MMBV-MS), 1 gypseux (MMBV) et 8 halitiques (MMBV) (tabl. 1). Les échantillons de sel ont fait l'objet d'une étude minéralogique (RX) et pétrographique (lames minces). Les échantillons argileux ont fait l'objet d'une étude de la MO (pyrolyse Rock-Eval [RE] et examen palynologique), ainsi que de frottis et d'analyses par diffractométrie des RX. Ces échantillons correspondent au sédiment originel ainsi qu'à la saumure interstitielle qui a recristallisé lors du séchage à l'air des carottes.

### III - MÉTHODES

#### 1. Pyrolyse Rock-Eval

Pour compléter les analyses de carbone organique réalisées à l'ORSTOM sur les 47 premiers mètres du sondage, 56 échantillons « marneux » d'apparence ont été analysés par pyrolyse Rock-Eval à l'IFP. Ils correspondent aux 74 premiers mètres du sondage.

Les analyses, sur roche brute, ont été faites sur un appareil de type Rock-Eval II muni d'un module de carbone, selon la méthode et les principes développés par ESPITALIÉ *et al.* (1977, 1985, 1986). On mesure ainsi les valeurs de carbone organique total (COT en % pondéral), la quantité d'hydrocarbures présents à l'état libre dans la roche (S1 en mg HC/g), les composés hydrocarbonés (S2 en mg HC/g), les composés oxygénés S3 (en mg CO<sub>2</sub>/g) et la température du maximum de formation d'hydrocarbures à partir du kérogène (Tmax en °C) ; à partir de ces valeurs, on calcule ensuite l'indice d'hydrogène (IH en mg HC/g COT) et l'indice d'oxygène (IO en mg CO<sub>2</sub>/g COT) (tabl. 2).

#### 2. Techniques de préparation et d'analyse de la matière organique et des faciès palynologiques

L'analyse de la matière organique extraite des roches par les techniques palynologiques se fait de façon à pouvoir quantifier le volume total de MO et des différents constituants du palynofaciès par rapport à un poids donné de roche.

##### *Attaques minérales*

- à l'acide chlorhydrique pour la dissolution des carbonates ;
- à l'acide fluorhydrique concentré à chaud pour la dissolution des silicates.

Le résidu de ce traitement est formé de matière organique et de sulfures (pyrite) ou d'oxydes (magnétite) de fer. Le volume de ce résidu est mesuré en ml, ce qui permet de calculer le volume de MO contenu dans la roche pour un poids standard de matériel.

##### *Préparations palynologiques et de palynofaciès*

Un volume connu de MO déshydratée est monté entre lame et lamelle pour des préparations de palynofaciès (SITTLER et SCHULER, 1991). Le reste du culot organique est soumis à des traitements à l'acide nitrique et à la

\* Les valeurs de carbonates sont sous-évaluées, car de la halite ayant cristallisé à partir des saumures interstitielles lors du séchage des échantillons est présente ; si on dissout avec de l'eau distillée cette halite, les valeurs de carbonates augmentent de façon significative (quelques échantillons test montrent que les dosages MCM peuvent passer de 9 à 20 % ou de 21 à 36 % de carbonates).

potasse pour dissoudre une partie du matériel organique et ne conserver que le phytoplancton et les spores et pollen pour des préparations palynologiques.

#### *Examen et mesure des lames de palynofaciès*

Une évaluation quantitative des constituants de la matière organique totale consiste à apprécier, au microscope et à un grossissement standard, la densité de la matière organique amorphe (MOA), de la matière organique figurée (MOF), de la pyrite et de la magnétite (Fe) occupant le champ optique du microscope. L'évaluation se fait en pourcentages (surfaciés) à l'aide de la charte de SHETSOV (1954). On passe ensuite à une estimation volumique en rapportant les valeurs précédentes au volume en ml de MO/10 g de sédiment. Cette estimation n'est pas rigoureuse dans la mesure où l'on passe d'estimations de surface à un volume, mais elle a le mérite de permettre la comparaison des variations quantitatives absolues de MOA, de MOF, des minéraux opaques, quel que soit le poids de sédiment initial traité par niveau.

Un comptage numérique des composants de la matière organique figurée (pollen, spores, algues...) permet d'obtenir le nombre d'individus par gramme de roche.

Une remarque préliminaire est à faire avant d'élaborer des hypothèses et des conclusions sur l'évolution et la composition de la matière organique dans le sondage Uyuni. Seuls les niveaux plus ou moins argileux ont été analysés au plan palynologique, car ils sont les seuls à renfermer suffisamment de matière organique pour en permettre l'étude. Or, ces niveaux argileux correspondent à des épisodes lacustres et pluvieux. Les phases les plus arides et salifères n'ont donc pas été étudiées.

## IV - RÉSULTATS

### 1. Résultats des analyses de pyrolyse Rock-Eval

Le tableau 2 indique, pour chaque échantillon « argileux » analysé (deux séries de mesures en général), les valeurs des principaux paramètres et, en particulier, celles du CO. L'échantillon 4675 cm prélevé au sommet du 6ème niveau halitique et l'échantillon 1683 cm correspondant à un faciès marneux très halitique n'ont pas été pris en compte dans ce tableau ni sur la figure 3 illustrant les variations du COT en fonction de la profondeur. Globalement, les valeurs sont faibles (< 2,6 %).

Sur la figure 3, les niveaux lacustres 2 et 4, relativement épais et bien étudiés tant à l'IFP qu'à l'ORSTOM, montrent que les résultats obtenus sont représentatifs des niveaux étudiés : si l'on excepte deux échantillons, ponctuellement plus riches en COT, analysés à l'ORSTOM (2380 et 3350 cm), on retrouve des évolutions similaires du COT. C'est ainsi que le deuxième niveau lacustre (820 - 1430 cm) peut être subdivisé en deux intervalles (de part et d'autre de 1130 cm), avec pour chacun d'eux des valeurs de COT globalement décroissantes de bas en haut.

---

Tabl. 2- Résultats des analyses de pyrolyse Rock-Eval correspondant aux échantillons prélevés dans les niveaux « lacustres » (chaque valeur correspond à la moyenne d'au moins deux mesures). Les valeurs non significatives n'ont pas été reprises dans le tableau ; ce sont celles de : - IH, IO, Tmax quand COT < 0,2 % ; - IO quand COT < 0,5 % ; - Tmax quand S2 < 0,2 mg/g COT. *Rock-Eval pyrolysis data for « lacustrine » samples (mean values corresponding at least to two measures). Non significant values (Hydrogen Index, Oxygen Index and Tmax when S2 < 0,2 mg/g TOC) are not reported*

Prof. cm	COT	S1	S2	S3	Tmax	IH	IO	niveau stratigraphique
640	0,79	1,72	3,48	6,54	429	443	832	1er niveau lacustre
840	0,32	0,40	1,18	4,04	418	373		2ème niveau lacustre
910	0,41	0,33	0,93	5,23	410	228		
960	0,35	0,41	0,96	3,98	403	276		
1050	0,53	0,48	1,66	5,54	420	312	1045	
1110	0,51	0,53	1,18	5,72	411	230	1122	
1160	0,20	0,21	0,51	2,78				
1240	0,32	0,41	1,01	3,91	404	317		
1300	0,46	0,50	1,37	4,37	430	301		
1350	0,42	1,16	1,44	4,43	411	343		
1410	0,58	0,71	2,10	7,42	424	359	1269	
1710	0,88	0,95	3,53	9,61	422	403	1098	3ème niveau lacustre
1790	0,94	0,98	4,34	8,79	432	460	931	
2230	0,23	0,32	0,69	7,60	406	291		4ème niveau lacustre
2290	0,10	0,55	0,23	0,61				
2370	0,19	0,28	0,82	3,63				
2495	0,44	0,54	1,94	5,00	430	440		
2560	0,40	0,60	1,38	3,78	428	348		
2627	0,39	0,69	1,62	4,99	429	422		
2695	0,23	0,22	0,50	4,13	392	217		
2765	0,47	0,47	1,61	4,70	422	340		
2830	0,28	0,35	0,97	4,19	415	346		
2890	0,14	0,20	0,49	3,91				
2945	0,11	0,16	0,42	5,02				
2990	0,12	0,27	0,28	4,25				
3060	0,12	0,24	0,33	5,18				
3130	0,12	0,23	0,38	4,67				
3225	0,20	0,39	0,57	5,87	398	278		
3285	0,35	0,45	1,49	2,92	413	426		
3340	0,28	0,31	1,12	2,96	423	407		
3400	0,27	0,28	1,02	4,83	414	380		
3460	0,37	0,55	1,78	5,26	430	482		
3530	0,56	0,57	2,39	6,42	424	431	1158	
4155	0,12	0,19	0,48	3,17				
4210	0,52	0,53	2,27	6,03	426	440	1170	5ème niveau lacustre
4340	0,20	0,38	0,85	4,14				
4645	0,30	0,42	1,34	4,34	416	448		
5355	2,58	3,56	13,90	4,89	432	539	190	6ème niveau lacustre
5405	0,29	0,20	0,92	4,85	414	316		
5465	0,17	0,27	0,65	1,40				
5540	0,15	0,35	0,63	3,42				
5605	0,07	0,20	0,23	0,36				
5680	0,10	0,21	0,54	0,38				
6195	0,45	0,48	1,69	5,79	547	376		7ème niveau lacustre
6260	0,40	0,31	0,92	5,74	410	229		
6310	0,49	0,48	1,39	4,61	418	281		
6380	0,36	0,24	0,85	4,47	482	236		
6435	0,30	0,41	1,36	0,83	521	446		
6510	0,44	1,26	1,00	2,48	596	228	562	
6750	0,23	0,18	0,65	5,80	418	280		
6800	0,04	0,16	0,07	0,99				8ème niveau lacustre
7260	0,72	1,69	2,42	4,08	396	334		9ème niveau lacustre
7310	0,30	0,17	0,63	6,49	547	210		
7370	0,12	0,23	0,38	1,87	595	300		

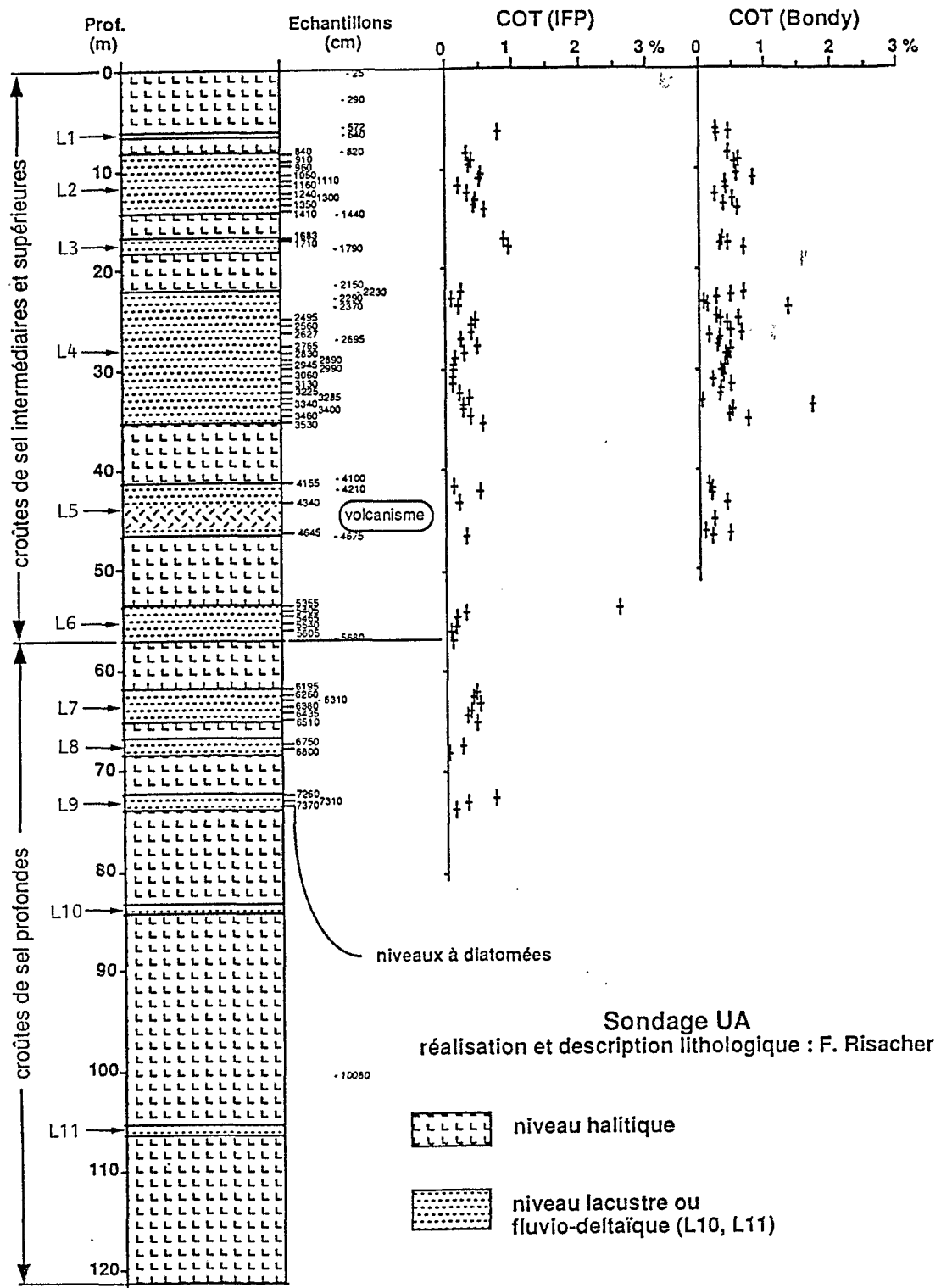


Fig. 3- Le sondage profond UA : description lithologique (F. Risacher), niveaux à diatomées et valeurs de Carbone Organique Total (COT en % pondéral). *UA deep well : lithologic description (F. Risacher), diatoms rich levels and Total Organic Carbon values*



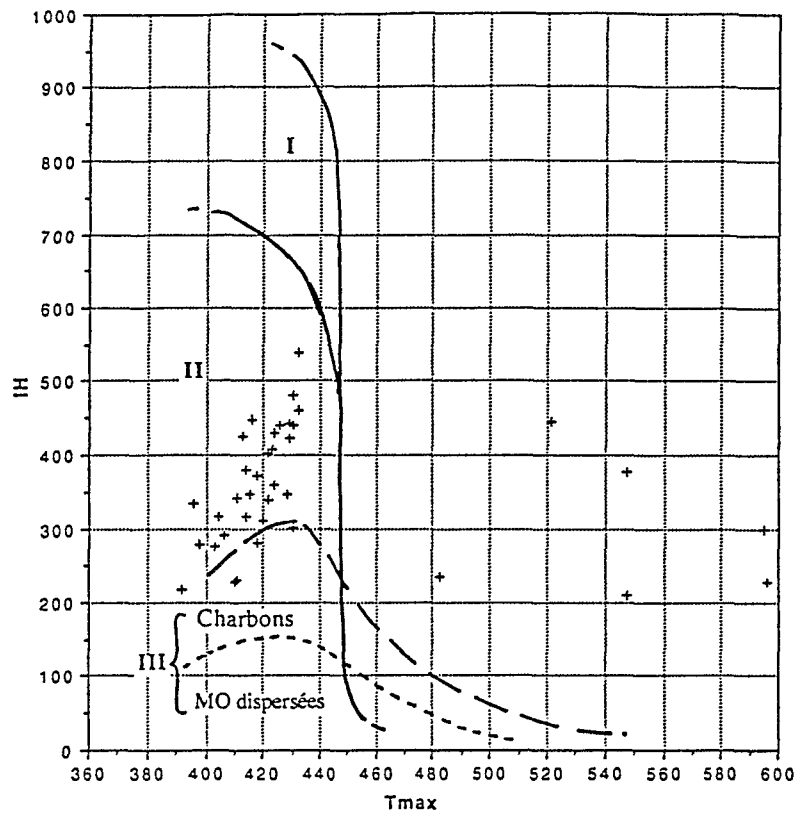


Fig. 4- Diagramme IH-Tmax. *HI-Tmax diagram*

Les valeurs moyennes relatives à chaque échantillon argileux ont été reportées sur les diagrammes IH, Tmax (fig. 4) et IH, IO (fig. 5). Le diagramme IH/Tmax (fig. 4) montre qu'aucun des échantillons étudiés ne correspond à une MO de type I (typiquement observée dans les Green River Shales à algues planctoniques lacustres, cf. ESPITALIÉ *et al.*, 1985) ; ils se situent plutôt dans le domaine de type II (classiquement attribué à la MO sapropélique marine). Comme pour de très nombreuses séries évaporitiques (effet de matrice minérale ?), l'indice d'oxygène (IO) mesuré sur roche brute est anormalement élevé, avec des valeurs très variables comprises entre 190 à 1269 mg CO<sub>2</sub>/g COT (pour les échantillons avec COT > 0,5%).

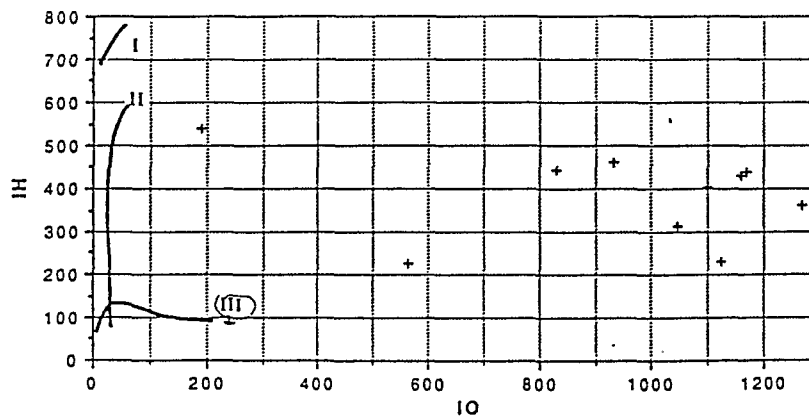


Fig. 5- Diagramme IH-IO. *HI-OI diagram*

Le diagramme IH, IO (fig. 5), montre que les échantillons sont comparables : (1) aux sédiments argilo-carbonatés du bassin potassique oligocène de Mulhouse, qui après extraction du kérogène correspondent à une MO de type II (BLANC-VALLERON *et al.*, 1991 ; 1994 ; GÉLY *et al.*, 1993) ; (2) aux sédiments actuels du fond du lac Bogoria (TIERCELIN *et al.*, 1987, fig. 41F et G et fig. 42) où la MO est à dominante amorphe.

## 2. Résultats des analyses palynologiques

### a) Origine et composants de la matière organique rencontrés dans le sondage Uyuni UA

La matière organique se présente, dans les préparations, sous forme amorphe (MOA) ou figurée (MOF).

#### • La matière organique amorphe (MOA)

Elle se présente sous forme granuleuse, floconneuse, filamenteuse, en amas plus ou moins importants ou en granules isolés (Pl. I, 13, 15, 16). Son degré de diagenèse peut être estimé à partir de la coloration. La matière organique amorphe est généralement considérée comme ayant une origine algale sapropélique. Une partie peut également provenir de la dégradation de végétaux supérieurs, d'origine continentale, transportés dans le bassin.

#### • La matière organique figurée

Il s'agit de tous les débris, organes ou organismes allant du phytoplancton algale (d'origine lacustre ou saumâtre) aux organites végétaux d'origine continentale (spores, pollens, bois, cuticules, tissus), ainsi que des sulfures et oxydes de fer présents dans les palynofaciès (Pl. I, 6 et 14).

Dans le sondage Uyuni UA, un certain nombre de groupes ont été identifiés :

#### 1. Origine saumâtre ou lacustre

Les microrestes trouvés sont essentiellement de nature algale.

#### Algues vertes (Division : *Chlorophyta* - Ordre : *Chlorococcales*)

##### Famille : *Hydrodictyaceae* - Genre : *Pediastrum*

*Pediastrum* est une algue verte coloniale flottante, vivant à la surface des eaux douces, de lacs et d'étangs. Sa distribution est cosmopolite. Les colonies ou coenobies (Pl. I, 2 à 5) sont formées de 10-200 coenocystes, cellules triangulaires, disposées concentriquement en groupements discoïdes, aplatis. La membrane peut être lisse ou ornée. A l'état fossile, cette algue est pratiquement toujours rencontrée dans des dépôts d'eau douce (WILSON et HOFFMEISTER, 1953 ; SING et KHANNA, 1978 ; PARRA BARRIENTOS, 1979 ; WEILER, 1971 et 1985). Sa présence dans des séries salifères (EVITT, 1963) peut s'expliquer par un transport du continent vers le bassin ou par son développement lors des phases lacustres de sédimentation.

##### Famille : *Botryococcaceae* - Genre : *Botryococcus*

Ces algues planctoniques vertes vivent à la surface des étangs et des lacs dans des eaux douces ou légèrement saumâtres, où elles sont très prolifiques et forment un phénomène d'« écume » appelé aussi « fleurs d'eau », donnant à l'eau une couleur brun-rouge. La morphologie rappelle celle de « chou-fleur » ou de polypes. Chaque colonie est formée d'un nombre variable de cupules gélatineuses disposées radialement dans lesquelles se trouvent des cellules de forme ovoïde (Pl. I, 1). Les botryococcacées jouent un rôle important dans la formation de sapropèles riches en hydrocarbures (TRAVERSE, 1955).

La présence de ces algues, dans des sédiments, est l'indice d'un milieu à tendance fortement continentale.

### Incertae sedis

Il s'agit d'éléments uni- ou pluricellulaires contenant quelquefois des inclusions, à paroi épaisse (Pl. I, 7 à 12). Ils sont entourés d'une membrane certainement organique, non minéralisée, car les traitements palynologiques l'auraient détruite. On retrouve ces structures non minéralisées dans les frottis de sédiments bruts.

Des attributions à divers genres semblent possibles dans les algues vertes (MELCHIOR et WERDERMANN, 1954). Divers genres d'algues chlorophytes, se rapprochant des formes rencontrées dans UA, ont été décrits dans des lacs voisins (Titicaca, situé plus Nord) par ILTIS (1984, 1992, in DEJOUX et ILTIS (Eds), 1992), ILTIS *et al.* (1984), YBERT (1992) : *Ankistrodesmus*, *Spirogyra*, *Mougeotia*, *Zygnema*, *Chlamydomonas*, etc. L'aspect et la morphologie des formes rencontrées les rapprocheraient du genre *Chlamydomonas*.

*Division : Chlorophyta - Ordre : Chlamydomonales*

*Famille : Chlamydomonaceae - Genre Chlamydomonas*

*Chlamydomonas* est une algue primitive biflagellée de taille inférieure à 20  $\mu\text{m}$ , à paroi cellulosique et à vacuoles contractiles. Les chlamydomonales vivent principalement en eau douce. Quelques formes marines sont également connues. (TAPPAN, 1980). Les formes fossiles (probablement les zoospores ou zygosporés) sont, cependant, assez rares à cause de l'instabilité des parois cellulosiques.

*Chlamydomonas* est connu actuellement dans des eaux sursalées d'origine marine (Deep Lake/Vestfold Hills / Antarctique) ou d'origine continentale (Mono Lake / Californie) (JAVOR, 1989). *C. subcaudata* a été décrit dans des lacs hypersalins froids antarctiques ou d'altitude (Lake Bonney) avec des organismes associés (GOLDMAN *et al.*, 1967; KOOB et LEISTER, 1972; PARKER *et al.*, 1982; SEABURG *et al.*, 1983). *Chlamydomonas* a été aussi trouvé à Mono Lake, lac alcalin d'altitude de Californie (WINKLER, 1977).

A. ILTIS (1992), dans son étude sur le phytoplancton du lac Titicaca, montre qu'entre 1985 et 1987, les chlorophytes ont représenté le plus grand nombre d'espèces parmi les dominants de la biomasse dans la partie bolivienne du lac.

La morphologie de *Chlamydomonas* et sa présence actuelle dans des milieux hypersalins froids ou d'altitude élevée semblent de bons indices pour attribuer les *incertae sedis* de Uyuni à ce genre.

## 2. Origine continentale

Parmi les restes végétaux trouvés dans les sédiments et reconnus dans les préparations palynologiques, il faut citer les débris de *bois*, des *cuticules*, des *tissus végétaux*. Leur abondance dans les préparations témoigne de l'importance des apports continentaux. Parmi les apports d'origine continentale figurent les spores de ptéridophytes et de bryophytes (Pl. II, 3, 6), le pollen de gymnospermes (Pl. II, 1, 4, 5), d'angiospermes monocotylédones (Pl. II, 9 et 10) et d'angiospermes dicotylédones (Pl. II, 11 à 31 et Pl. III, 1 à 36).

### b) Observations et résultats de l'analyse palynologique

#### • COT et matière organique

La richesse en matière organique du sédiment est mesurée d'une part par le pourcentage pondéral de COT (pyrolyse Rock-Eval) (annexe 1), et d'autre part par le volume (rapporté à 10 g de sédiment) de matière organique en ml dans le culot (MOA + MOF) obtenu après préparation palynologique (annexe 2).

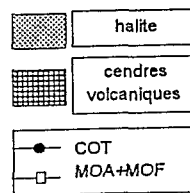
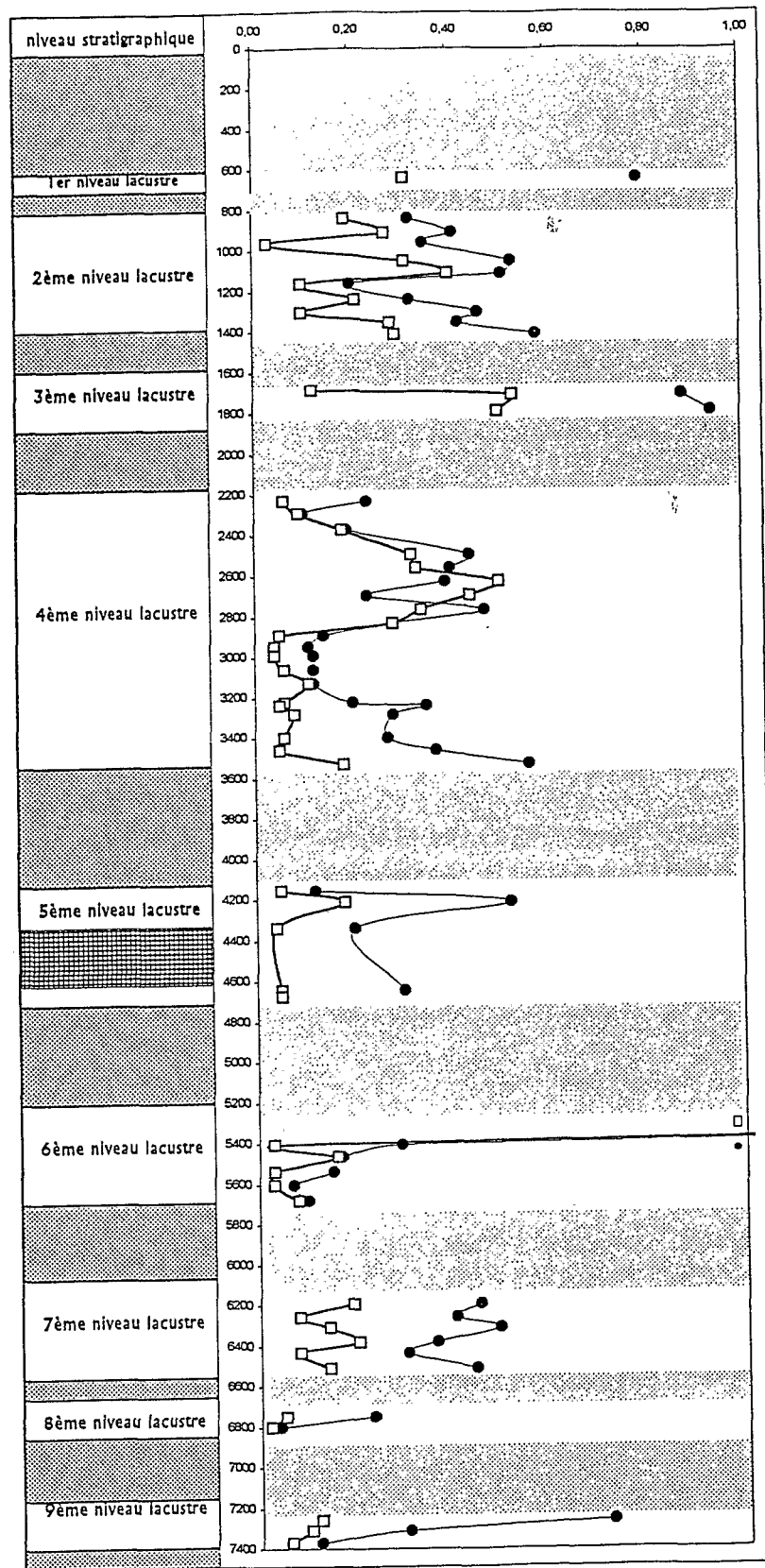


Fig. 6- Estimation du volume (ml) de la matière organique amorphe et figurée (MOA + MOF) contenu dans 10 g de sédiment ; comparaison avec les résultats de pyrolyse Rock-Eval (COT) - profondeur en cm. *Estimated amounts of the amorphous and figured organic matter (ml) present within 10 g of sediment ; comparison with Rock-Eval pyrolysis data - depth in cm*

Les courbes représentatives du COT et de MOA + MOF concordent bien, en règle générale (fig. 6). Cela confirme nombre d'observations antérieures (BLANC-VALLERON *et al.*, 1991 et 1994 ; SCHULER *et al.*, 1991 ; GÉLY *et al.*, 1993).

Cependant, pour quelques niveaux, les courbes de COT et de MOA + MOF semblent parfois varier en sens contraire ; ces distorsions entre les résultats des deux méthodes pourraient être dues à la difficulté de distinguer, dans les préparations palynologiques, certains débris charbonneux de la pyrite ou de la magnétite. S'y ajoute le problème de l'hétérogénéité de l'échantillonnage : il n'a pas été possible de prélever, sur les carottes, des prises absolument identiques pour les deux types d'analyse.

#### • Evolution des composants de la matière organique

Lorsqu'on analyse l'évolution des composants de la matière organique dans le sondage Uyuni UA, un certain nombre de remarques se dégagent.

Les volumes de matière organique (MOA, MOF, oxydes [magnétite] et sulfures de Fe [pyrite]) contenus dans les sédiments sont très faibles, de l'ordre de 0,05 à 0,6 ml pour 10 g de roche (sauf le niveau 5355 cm qui en renferme 2 ml pour une valeur de COT également élevée : 2,58) (annexe 2 et fig. 7).

La matière organique amorphe est de loin le composant principal de la matière organique des sédiments (de 0,4 à 0,01 ml pour 10 g de roche). Elle est de nature finement granuleuse, avec les granules (Pl. I, 16) souvent agglomérés en amas (Pl. I, 13) et de couleur jaune clair voire transparente, donc très peu évoluée. Elle est davantage présente dans les trois premiers niveaux lacustres ainsi que dans la partie supérieure du 4ème niveau lacustre. A partir de 29 m, elle n'est plus que très faiblement représentée, sauf à de rares niveaux plus isolés (fig. 7).

Dans les 5ème, 6ème et 7ème niveaux lacustres (entre 40 et 64 m), elle se différencie par sa couleur et son aspect ; elle est de couleur brune à brun foncé, en amas souvent compacts (Pl. I, 15). Ce phénomène peut être mis en relation avec l'arrivée, à ce moment, de cendres volcaniques encore chaudes sur le fond du bassin au cours du dépôt du 5ème niveau lacustre, en supposant que la température de ces cendres ait encore été suffisamment importante pour « brûler » la MO de ce niveau et des deux sous-jacents.

Cependant, dans l'ensemble du sondage, il n'a pas été possible d'observer une relation entre les valeurs de Tmax et la couleur de la MOA.

La matière organique figurée est présente dans presque tous les niveaux mais en quantités très faibles, entre 0 et 0,15 ml/10 g de roche (annexe 3). Elle est essentiellement d'origine végétale, soit continentale (spores, pollen, débris ligneux, cuticules), soit lacustre algale.

Les cristaux noirs, sphériques ou cubiques (Pl. I, 6, 14), correspondent essentiellement, dans les niveaux étudiés, à des oxydes de Fe (magnétite) ou beaucoup plus rarement à des sulfures de Fe (pyrite). Ils sont présents régulièrement dans tout le sondage.

Les proportions de ces cristaux varient généralement en sens inverse de celles de la matière organique amorphe, mais apparaissent sans relation avec l'évolution de la matière organique figurée (fig. 7 et 8). S'il s'agit d'oxydes de fer (magnétite) et les conditions oxydantes du milieu de dépôt sont vraisemblablement défavorables à la conservation de la MOA au cours de la fossilisation.

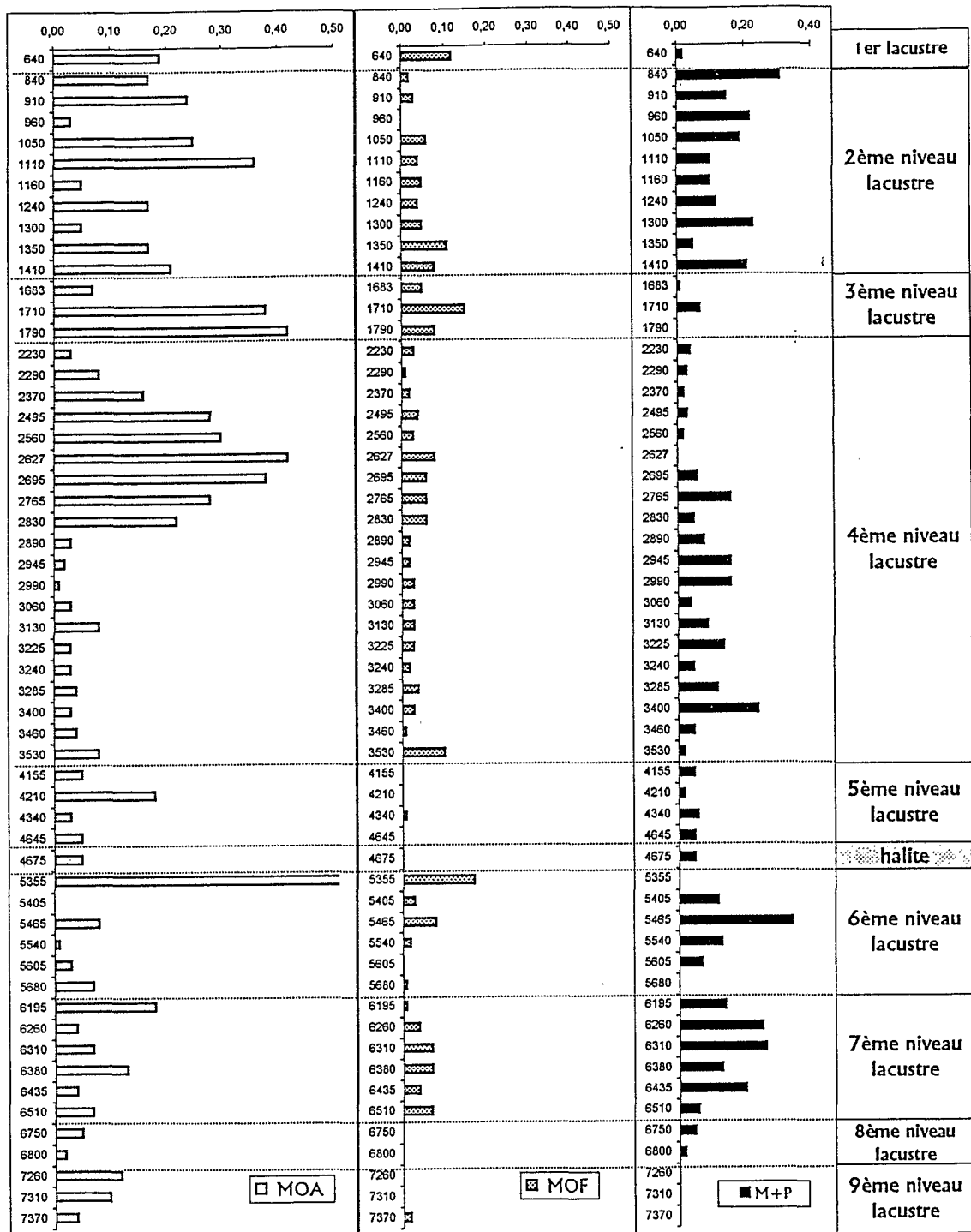


Fig.7- Evolution des composants du culot palynologique dans le sondage UA (en ml/10 g de roche) - profondeur en cm - MOA : matière organique amorphe, MOF : matière organique figurée, M+P magnétite + pyrite. Evolution of the components of the palynological residue - depth in cm - MOA : amorphous organic matter, MOF : figured organic matter, M+P : magnetite + pyrite

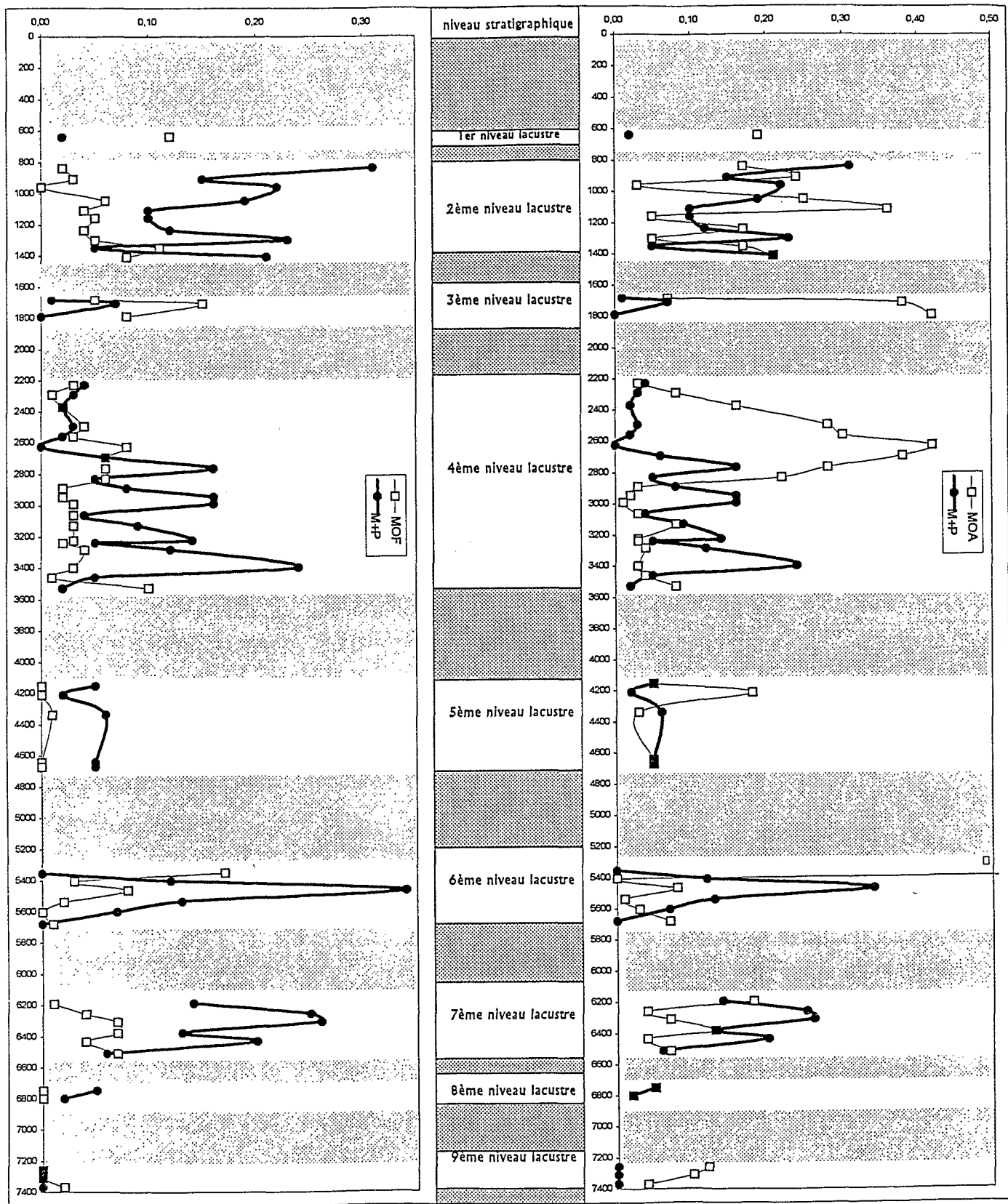


Fig. 8 - Evolution de la matière organique amorphe et figurée comparée à celle de la pyrite et de la magnétite - profondeur en cm - en grisé : niveau de halite *Variation of amorphous organic matter and figured organic matter compared to variation of pyrite + magnetite - depth in cm - in grey : halite level*

• *Evolution des composants de la matière organique figurée*

**Eléments d'origine lacustre : *Pediastrum*, *Botryococcus***

Ils sont plus ou moins répartis dans tout le sondage (annexe 3 et fig.9).

L'algue *Pediastrum* est régulièrement présente sauf dans les niveaux lacustres 5, 8 et 9 dont elle est absente, et très faiblement représentée dans le niveau lacustre 6. Elle est le composant principal de la matière organique figurée de ce sondage. Plusieurs espèces seraient probablement à distinguer (Pl. I, 2, 3, 4, 5). La présence de cette algue est un indicateur de période de dessalure des eaux du lac, et correspond aux phases les plus lacustres.

L'algue *Botryococcus* (Pl. I, 1) n'est présente que dans quelques niveaux plus ou moins dispersés.

« *Incertae sedis* » - *Chlamydomonas*

Ces algues uni- ou pluricellulaires (Pl. I, 7 à 12) sont présentes dans les niveaux lacustres 1, 2, 3 et 7 (annexe 3 et fig.9).

**Spores et pollen**

Ils sont présents dans presque tous les niveaux où la matière organique figurée est présente dans les préparations (annexe 3). Les mêmes espèces de spores ou de pollen sont présentes à travers tout le sondage, avec pour chaque espèce très peu d'individus. Il n'a donc pas été possible de faire des comptages pour analyser les variations de la composition spécifique de la microflore.

Parmi les familles ou genres identifiés (LOZANO GARCIA, 1979 ; MARKGRAF et D'ANTONI, 1978 ; HEUSSER, 1971 ; MOORE *et al.*, 1991), on reconnaît :

*Spores de ptéridophytes et de bryophytes*

Polypodiaceae (Pl. II, 3)

Salviniaceae : *Azolla* (Pl. II, 6)

Hepaticae

*Pollen de gymnospermes*

Pinaceae (Pl. II, 1)

Podocarpaceae : *Dacrydium* (Pl. II, 4)

Podocarpaceae : *Podocarpus* (Pl. II, 5)

Ephedraceae : *Ephedra* (Pl. II, 7)

*Pollen d'angiospermes monocotylédones*

Graminae (Pl. II, 9 et 10)

Hydrocharidaceae (Pl. II, 8)

*Pollen d'angiospermes dicotylédones*

Amaranthaceae (Pl. II, 24 et 25)

Betulaceae : *Alnus* (Pl. II, 19 et 20)

Betulaceae : *Betula* (Pl. II, 15)

Betulaceae : *Corylus* (Pl. II, 14)

Caryophyllaceae (Pl. III, 22-23, 24-25)

Chenopodiaceae (Pl. II, 26 et 27)

Compositae (Pl. III, 6, 10-11, 14-15, 16-17, 18-19, 20-21)

Convolvulaceae (Pl. III, 9)

Haloragaceae type *Haloragis* (Pl. II, 28 et 29)

Haloragaceae type *Myriophyllum* (Pl. II, 21 ; Pl. II, 12 et 13)



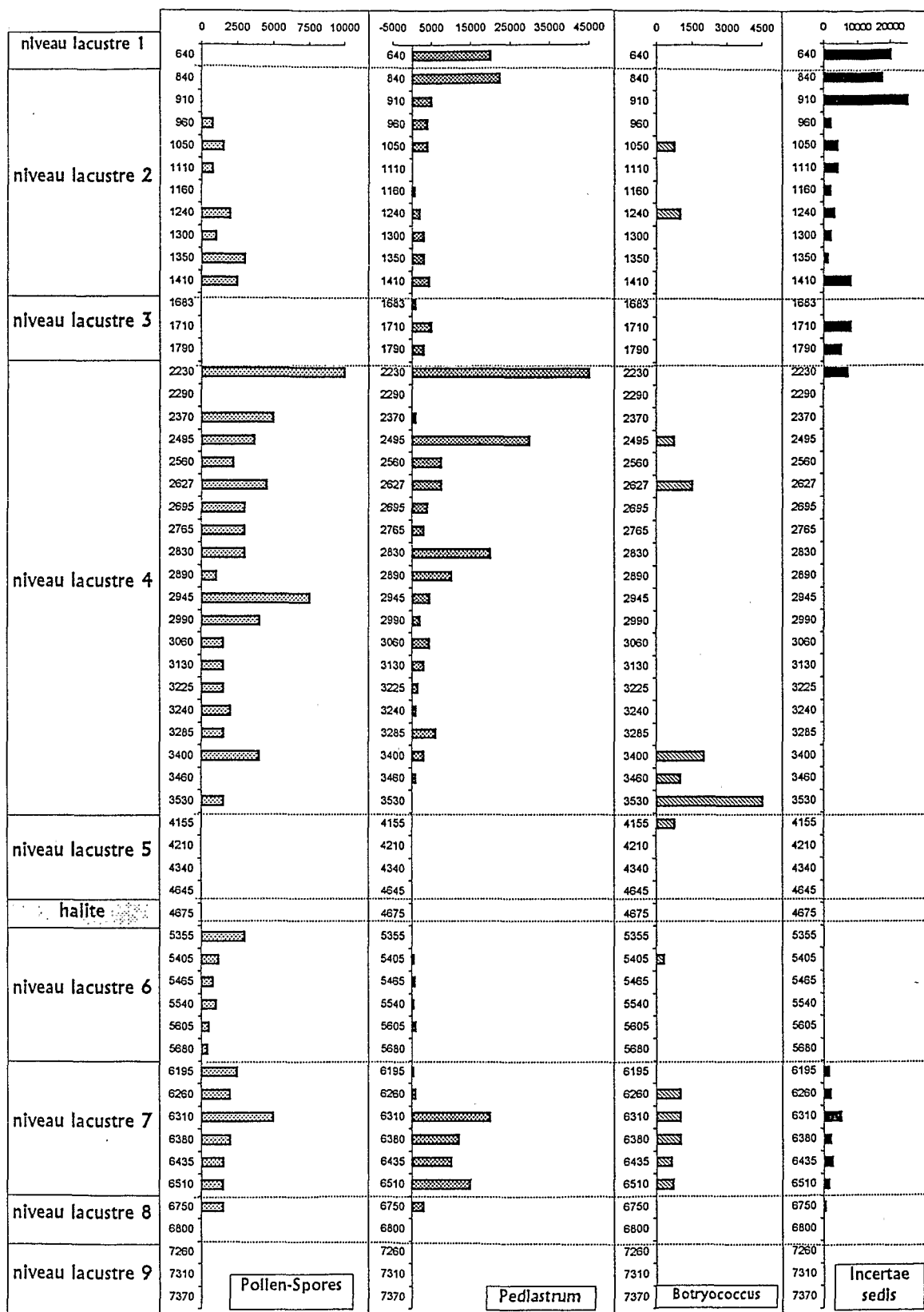


Fig. 9- Composition de la matière organique figurée (fréquences absolues, pour 1 g de sédiment, des spores et pollens, *Pediastrum*, *Botryococcus*, *Incertae sedis*) dans le sondage UA - profondeur en cm. *Composition of figured organic matter (absolute frequencies for the different elements in 1 g of sediment) in UA borehole - depth in cm*

Labiatae (Pl. III, 3 et 4)  
 Leguminosae - Papilionaceae (Pl. II, 16 et 17 ; 30 et 31)  
 Myricaceae : *Myrica* (Pl. II, 11 et 18)  
 Passifloraceae ? (Pl. II, 2)  
 Rosaceae type *Polylepis*, *Acaena*... (Pl. III, 7-8, 26-27, 28-29, 30-31, 32) \*  
 Umbelliferae (Pl. III, 33, 34-35-36)  
 Verbenaceae (Pl. III, 12-13)

### *Végétation, environnement et climat*

La végétation productrice des spores et pollen reconnus dans le sondage correspond à une végétation de type steppe de montagne, dominée par les *Podocarpaceae*, *Compositae*, *Graminae*, *Rosaceae*. L'environnement salin est favorable au développement des *Chenopodiaceae*, *Ephedraceae*. Des plantes aquatiques, telle *Myriophyllum*, sont présentes. Des flores plus ou moins analogues ont été décrites dans les environnements anciens du lac Titicaca (YBERT, 1992).

Les sédiments de Uyuni sont caractérisés par une pauvreté relative en éléments de matière organique figurée (ceux-ci sont relativement réduits dans le sondage UA car les conditions climatiques étaient certainement peu favorables à un développement quantitatif très important de la végétation environnante) et par une dominance de la MOA provenant de la biomasse algale lacustre.

Le climat actuel est sec et froid (température moyenne annuelle +10°C), caractérisé par l'alternance d'une saison sèche et froide en hiver (-20°C) et d'une saison moins froide (+ 20°C) et pluvieuse en été. Les précipitations sont de 300 mm/an. La végétation actuelle est pauvre à steppique.

Dans le sondage, on a cependant pu reconnaître, du moins en ce qui concerne les phases pluvieuses, étudiées à travers les niveaux de marnes, une diversification spécifique de la végétation assez intéressante malgré la pauvreté quantitative. On peut donc envisager des conditions climatiques légèrement plus favorables à la « richesse spécifique » d'une végétation que celles existant actuellement.

Des frustules de diatomées ont été observées dans les niveaux lacustres L1 et L2 (F. SYLVESTRE, communication orale et thèse en cours). Elles sont fortement affectées par des phénomènes de dissolution, à l'image de ce qui avait été observé sur les sédiments actuels (BADAUT et RISACHER, 1983). Leur étude taxonomique précise, qui aurait permis, à l'image de ce qui a été réalisé pour la flore des affleurements de bordure (SYLVESTRE *et al.*, 1995), d'apporter des renseignements d'ordre écologique et climatique, n'est donc pas possible.

### 3. Résultats des analyses minéralogiques et pétrographiques

Les analyses des carbonates sur les sédiments des niveaux lacustres (tabl. 4) montrent des valeurs relativement faibles (carbonates < à 25 %). On ne voit pas de relation évidente (positive ou négative) entre les fluctuations de valeur des carbonates et celles du COT, sauf peut-être pour les niveaux lacustres 3 et 5 (résultats non significatifs car trop faible nombre d'échantillons).

L'analyse par diffraction des RX permet de noter :

- la présence d'aragonite dans le 2ème niveau lacustre entre 840 et 1350 cm (déjà mise en évidence par M.P. ZINS-PAWLAS (1988), ainsi que dans le 5ème niveau lacustre (à 4210 cm, associée avec de la calcite fortement magnésienne) ;
- l'existence, en sus de la calcite faiblement magnésienne, de calcite fortement magnésienne et de dolomite (plus ou moins calcique) à certains niveaux ;
- l'existence de bassanite ou hémihydrate (voire d'anhydrite) au voisinage de la passée volcanique signalée du 5ème niveau lacustre : les cendres ont dû arriver sous forme de nuées ardentes (encore chaudes) sur le fond du bassin, ce qui laisse supposer que l'épaisseur de la tranche d'eau était relativement faible à ce moment-là ;

- la mise en évidence de la célestite dans le 6ème niveau lacustre (5405, 5540 et 5605 cm de profondeur) ;
- la présence d'une phase inconnue à 820 cm (raies de la kalistrontite,  $K_2Sr(SO_4)_2$ , mais décalées vers les petits angles), au sommet du deuxième niveau lacustre (faciès vert à la base d'une passée gypseuse blanche).

Les analyses pétrographiques ont été réalisées sur des frottis pour les sédiments meubles (faciès lacustres de type argile) ; quelques lames minces ont été également réalisées dans les croûtes halitiques plus ou moins poreuses, après induration.

Les frottis permettent de mettre en évidence dans les niveaux lacustres les phases amorphes ne diffractant pas aux RX, à savoir les diatomées et les cendres volcaniques (en quantité plus ou moins importante) ; on notera par ailleurs que les carbonates et le gypse correspondent souvent à des coprolithes (*Artemia*).

L'échantillon de halite le plus superficiel étudié (25 cm sous la surface du salar) (Pl. IV, 1 à 3) correspond à la partie sommitale de la couche halitique la plus récente qui est soumise à des processus annuels de dissolution / recristallisation : lors de la mise en eau du salar durant la saison humide, il y a dissolution partielle de la croûte avec formation d'un réseau de vides subverticaux (Pl. IV, 1) qui progresse principalement en bordure des cristaux, créant une topographie superficielle irrégulière ; lors des phases d'assèchement, de la halite recristallise et de fines particules sédimentaires sont piégées en surface (bandes onduleuses) ainsi que des amas de petits cristaux à la base de certains vides (Pl. IV, 2). L'importance des phénomènes de dissolution / recristallisation explique l'absence de structures primaires, habituellement matérialisées par des inclusions en bandes parallèles qui soulignent les faces de croissance cristalline ; on en observe néanmoins plus bas dans cette première couche de halite (Pl. IV, 3).

De telles structures primaires sont plus ou moins bien préservées dans les 7 autres échantillons étudiés, entre 2,90 et 100,6 m de profondeur. Ces structures sont caractéristiques d'une cristallisation sur le fond du bassin (faciès en chevrons, Pl. IV, 3, 5 et 6), au sein du corps d'eau sursalé ou à l'interface air/saumure (faciès en trémies, Pl. IV, 4).

Des fluctuations rapides du milieu sont identifiées dans les 1ère et 2ème croûtes halitiques (faciès lités à 5,72 m et 7,20 m) par l'alternance de niveaux centimétriques grossiers à trémies de sel et de niveaux détritiques fins correspondant au remaniement de niveaux halitiques à partir des bordures du bassin, sous l'effet de la déflation éolienne (Pl. IV, 4). Par ailleurs, des phénomènes de dissolution / recristallisation plus ou moins intenses sont également observés dans ces différentes couches. L'échantillon étudié dans la quatrième couche halitique ne présente presque plus aucune structure primaire, mais un faciès relativement homogène et fin, sauf quelques cristaux isolés de plus grande taille (Pl. IV, 7). Les phénomènes de dissolution / recristallisation, bien visibles en périphérie des cristaux, se traduisent par une porosité plus ou moins importante de la halite limpide -parfois en doigt de gants- et qui correspond à une recristallisation de saumures dans d'anciens vides de dissolution (Pl. IV, 3, 5 et 6), et des cristaux de gypse millimétriques, isolés ou en rosettes (Pl. IV, 6, 9 et 10).

Les quelques lames minces réalisées montrent que la halite présente des faciès variés avec des structures primaires caractéristiques d'une cristallisation en milieu aquatique ; à ces faciès se superposent souvent d'intenses phénomènes de dissolution / recristallisation. Ceci, ainsi que les fluctuations rapides du milieu (lors du dépôt de la première et de la deuxième couche halitique), milite en faveur d'une faible épaisseur du corps d'eau lors du dépôt de la halite.

## CONCLUSIONS

Comme dans d'autres alternances « banc de halite - banc argilo-carbonaté », la matière organique présente dans les intercalaires argileux est principalement d'origine algale et ses paramètres de pyrolyse Rock-Eval la rapprochent d'une matière organique sapropélique marine de type II.

Les informations fournies par les données palynologiques et les données minéralogiques du 5ème niveau lacustre sont à mettre en relation avec l'arrivée de cendres volcaniques encore chaudes sur le fond du bassin au cours du dépôt, ce qui laisserait supposer une relativement faible épaisseur de tranche d'eau à ce moment.

La matière organique étudiée, correspondant à un dépôt en milieu intracontinental, sous climat froid et aride, ne forme pas de niveaux très riches en matière organique, à la différence de ce qui peut s'observer dans les milieux évaporitiques sous climat non froid, qu'ils soient fossiles ou actuels : la température (ici induite par l'altitude élevée) est un facteur limitant très important en ce qui concerne le potentiel pétrologène des environnements salins, parce que la végétation steppique de zone froide est peu développée (d'où des apports de matière organique d'origine terrestre réduits) et parce que la température du corps d'eau est bien inférieure à la gamme de températures optimales indispensable à un développement important de la biomasse algale.

**Remerciements :** La réalisation du sondage profond UA a été possible grâce au concours logistique et financier de l'ORSTOM. Les auteurs remercient A. Huc (IFP) pour les analyses de pyrolyse Rock-Eval.

### BIBLIOGRAPHIE

- BADAUT D. & RISACHER F. (1983) - Authigenic smectite on diatom frustules in Bolivian saline lakes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47, p. 363-375.
- BALLIVAN O. & RISACHER F. (1981) - Los salares del Altiplano boliviano. Metodos de estudio y estimacion economica. ORSTOM, Paris, 246 p.
- BLANC-VALLERON M.M., GELY J.P., SCHULER M., DANY F. & ANSART M. (1991) - La matière organique associée aux évaporites de la base du Sel IV (Oligocène inférieur) du bassin de Mulhouse (Alsace, France). *Bull. Soc. géol. France*, 162, 1, p. 113-122.
- BLANC-VALLERON M.M., SCHULER M., RAUSCHER R, CAMOIN G. & ROUCHY J.M. (1994) - La matière organique des séries d'âge Crétacé supérieur-Tertiaire inférieur du bassin de Potosi (Cordillère orientale, Bolivie) : apports stratigraphiques et paléogéographiques. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 319, II, p. 1359-1366.
- DEJOUX C. & ILTIS A. (1992) - Lake Titicaca. A synthesis of limnological knowledge. (Eds) Kluwer Acad. Publ., 567 p.
- ESPITALIE J., DEROO G. & MARQUIS F. (1985) - La pyrolyse Rock-Eval et ses applications. *Rev. Inst. fr. Pétrole*, 40, 5, p. 563-579 ; 40, 6, p. 755-784 .
- ESPITALIE J., DEROO G. & MARQUIS F. (1986) - La pyrolyse Rock-Eval et ses applications. *Rev. Inst. fr. Pétrole*, 41, 1, p. 73-89.
- ESPITALIE J., LAPORTE J.L., MADEC M., LEPLAT P., PAULET J. & BOUTEFEU A. (1977) - Méthode rapide de caractérisation des roches mères, de leur potentiel pétrolier et de leur degré d'évolution. *Rev. Inst. fr. Pétrole*, 32, 1, p. 23-42.
- EVITT W.R. (1963) - Occurrence of freshwater alga *Pediastrum* in Cretaceous marine sediments. *Amer. J. Sci.*, 261, p. 890-893.
- GELY J.P., BLANC-VALLERON M.M., FACHE-DANY F., SCHULER M. & ANSART M. (1993) - Characterization of organic-rich material in an evaporitic environment : The Lower Oligocene of the Mulhouse basin (Alsace, France). *Geol. Rundsch.*, 82, p. 718-725.
- GOLDMANN C.R., MASON D.T. & HOBBIIE J.E. (1967) - Two Antarctic desert lakes. *Limnology and Oceanography*, 12, p. 295-310.
- HEUSSER C.J. (1971) - Pollen and spores of Chile. Univ. Arizona Press, 167 p.
- ILTIS A. (1984) - Algues du lac Titicaca et des lacs de la vallée d'Hichu Kkota (Bolivie). *Cryptogamie, Algologie*, 5, p. 85-108.

- ILTIS A. (1992) - Algae : General floristic study. Phytoplankton : Quantitative aspects and populations. In : DEJOUX C. & ILTIS A. (Eds) « Lake Titicaca. A synthesis of limnological knowledge », Kluwer Acad. Publ., p. 176-181 ; p. 182-195.
- ILTIS A., RISACHER F. & SERVANT-VILDARY S. (1984) - Contribution à l'étude hydrobiologique des lacs salés du sud de l'Altiplano bolivien. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 17, 3, p. 259-273.
- JAVOR (1989) - Hypersaline Environments. Microbiology and Biogeochemistry. Springer Ed., Berlin, 328 p.
- KATZ B.J. (1988) - Clastic and carbonate lacustrine systems : An organic geochemical comparison (Green River Formation and East African lake sediments). In : FLEET A.J., KELTS K. & TALBOT M.R. (Eds), « Lacustrine Petroleum Source Rocks », *Geol. Soc. Spec. Publ.* N° 40, p. 81-90.
- KOOB D.D. & LEISTER G.L. (1972) - Primary productivity and associated physical, chemical and biological characteristics of lake Bonney : A perennially ice-covered lake in Antarctica. In : LLANO G.A. (Ed.) « Antarctic terrestrial biology », *Antarctic Research Ser.*, 20, American Geophysical Union, Washington D.C., p. 51-61.
- LOZANO-GARCIA S. (1979) - Atlas de pollen de San Luis Potosi, Mexico. *Pollen et Spores*, 21, 3, p. 287-336.
- MARKGRAF V. & D'ANTONI H.L. (1978) - Pollen flora of Argentina. Univ. Arizona Press, 208 p.
- MELCHIOR H. & WERDERMANN E. (1954) - A. Engler's Syllabus der Pflanzenfamilien. Ed. Gebr. Borntraeger, Berlin. 12ème édition, Bd I, 367 p.
- MOORE P.D., WEBB J.A. & COLLINSON M.E. (1991) - Pollen analysis (2ème éd.). Ed. Blackwell Scientific Publications, 216 p.
- PARKER B.C., SIMMONS G.M., SEABURG K.G., CATHEY D.D. & ALLNUST F.T.C. (1982) - Comparative ecology of Plankton communities in seven Antarctic oasis lakes. *Journal of Plankton Research*, 4, p. 271-286.
- PARRA-BARRIENTOS O.O. (1979) - Revision der Gattung *Pediastrum* MEYEN (Chlorophyta). *Bibliotheca Phycologica*, 48, p. 1-185.
- RISACHER F. & FRITZ B. (1991) - Quaternary geochemical evolution of the salars of Uyuni and Coipasa, Central Altiplano, Bolivia. *Chemical Geology*, 90, p. 211-213.
- RISACHER F. & FRITZ B. (1992) - Mise en évidence d'une phase climatique holocène extrêmement aride dans l'Altiplano central par la présence de la polyhalite dans le salar de Uyuni (Bolivie). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 314, II, p. 1371-1377.
- RISACHER F. (1978) - Le cadre géochimique des bassins à évaporites des Andes boliviennes. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, X, 1, p. 37-48.
- RISACHER F. (1992 a) - Géochimie des bassins à évaporites de l'Altiplano bolivien. Thèse Univ. Louis Pasteur, Strasbourg.
- RISACHER F. (1992 b) - Géochimie des lacs salés et croûtes de sel de l'Altiplano bolivien. *Sci. Géol., Bull.*, 45, 3-4, 214 p.
- SCHULER M., BLANC-VALLERON M.M., GELY J.P. & ANSART M. (1991) - Matière organique et palynofaciès de l'Oligocène inférieur évaporitique du bassin de Mulhouse (France). *Palynosciences*, 1, p. 41-58.
- SEABURG K.G., KASPAR M. & PARKER B.C. (1983) - Photosynthetic quantum efficiencies of phytoplankton from perennially ice-covered Antarctic lakes. *Journal of Phycology*, 19, p. 446-452.
- SERVANT M. & FONTES J.C. (1978) - Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes boliviennes : premières interprétations paléoclimatiques. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, X, 1, p. 9-23.
- SERVANT M., FOURNIER M., ARGOLLO J., SERVANT-VILDARY S., SYLVESTRE F., WIRRMANN D. & YBERT J.P. (1995) - La dernière transition glaciaire/interglaciaire des Andes tropicales sud (Bolivie) d'après l'étude des variations des niveaux lacustres et des fluctuations glaciaires. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 320, IIa, p. 729-736.
- SHETSOV M.S. (1954) - Concernant quelques aides additionnelles pour l'étude des formations sédimentaires (en russe). *Bull. Moscow Soc. Naturalists, Geol. Ser.*, 29, 1, p. 61-66.
- SING H.P. & KHANNA A.R. (1978) - Some fossil species of *Pediastrum* and their palaeontological significance in the Subathu Formation of Himachal Pradesh. *The Paleobotanist*, p. 466-473.
- SITTLER C. & SCHULER M. (1991) - Une méthode d'analyse quantitative absolue de la fraction organique constituant le palynofaciès d'une roche sédimentaire. *Palynosciences*, 1, p. 59-68.

- SYLVESTRE F., SERVANT-VILDARY S., FOURNIER M. & SERVANT M. (1995) - Lake levels in southern Bolivian Altiplano (19°-21° S.) during the Late Glacial based on diatom studies. *Int. Journ. Salt Lake Res.* (sous presse).
- TAPPAN (1980) - The paleobiology of Plant protists. Ed. Freeman, San Francisco, 1028 p.
- TRAVERSE A. (1955) - Occurrence of the oil-bearing alga *Botryococcus* in lignites and other Tertiary sediments. *Micropaleontology*, 1, 4, p. 343-350.
- WEILER H. (1971) - Fossile Algen in jüngtertiären Süßwasserablagerungen des Mainzer Beckens und des Oberrheingrabens. *Abh. hess. Landesamt Bodenforschung*, 60, p. 178-186.
- WEILER H. (1985) - Die Grünalge *Pediastrum* MEYEN in tertiären Sedimente Südwest Deutschlands. *Mainzer geowiss. Mitt.*, 14, p. 307-343.
- WILSON L.R. & HOFFMEISTER W.S. (1953) - Four new species of fossil *Pediastrum*. *Amer. J. Sci.*, 251, p. 753-760.
- WINKLER D.W. (Ed.) (1977) - An ecological study of Mono Lake, California. *Inst. Ecology Publ.*, 12, Univ. California, 190 p.
- WIRRMANN D. & OLIVEIRA ALMEIDA L.F. (1987) - Low Holocene level (7700 to 3650 years ago) of lake Titicaca (Bolivia). *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 59, p. 315-323.
- YBERT J.P. (1992) - Ancient lake environments as deduced from pollen analysis. In : DEJOUX C. & ILLIS A. (Eds), lake Titicaca. Kluwer Academic Publ., p. 49-62.
- ZINS-PAWLAS M.-P. (1988) - Géochimie de la silice dans les saumures et les milieux évaporitiques. Thèse, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, 199 p.

## ANNEXES

Annexe 1- Valeurs des carbonates par manocalcimétrie (MCM), du COT et nature des minéraux carbonatés (d'après diffractométrie des rayons X). Quand la dolomite est présente, la valeur MCM est légèrement supérieure à celle des carbonates (le poids moléculaire de la dolomite étant supérieur à celui de la calcite et de l'aragonite). *Carbonate (MCM, from manocalcimetry) and TOC content in the studied section ; carbonate minerals according to X Ray Diffraction diagrams ; when dolomite is present, MCM values are slightly higher than real carbonate values (due to the higher molecular weight of dolomite)*

Annexe 2- Composants du résidu organique palynologique (en ml pour 10 g de roche) : matière organique amorphe (MOA), matière organique figurée (MOF), magnétite + pyrite (M+P). *Estimates of amorphous organic matter (MOA), figured organic matter (MOF) and magnetite + pyrite (M+P) (volumes present within 10 g of sediment)*

Annexe 3- Composants de la matière organique figurée (MOF) pour 1 g de sédiment : pollen, spores, *Pediastrum*, *Botryococcus*, incertae sedis. *Components of figured organic matter present within 1 g of sediments : pollen, spores, Pediastrum, Botryococcus, incertae sedis*

Annexe a : Valeurs de porosité (% volumique), carbonatométrie et pourcentage pondéral d'éléments détritiques, de halite et de gypse pour les 70 premiers mètres du sondage UA. *Porosity values (volume %), carbonatometry and weight percentages for detrital minerals, halite and gypsum for the 70 upper meters of UA borehole*

Annexe b : Valeurs de carbone organique et d'azote pour les échantillons analysés à l'ORSTOM ; les teneurs sont exprimées par rapport au sédiment d'origine séché à l'air ; elles incluent de la halite ayant cristallisé à partir de la saumure interstitielle. *Organic carbon and nitrogen values for samples analyzed at ORSTOM ; contents are related to air dried samples which include halite having crystallized from interstitial brines*

ANNEXE 1

Prof. cm	MCM	% COT	minéraux carbonatés	niveau stratigraphique
640	4,1	0,79	calcite + dolomite	1er niveau lacustre
820 vert	4,6		calcite + dolomite	
840	12,6	0,32	aragonite + calcite	
910	8,6	0,41	aragonite + calcite	2ème niveau lacustre
960	7,1	0,35	aragonite	
1050	10,6	0,53	aragonite	
1110	9,1	0,51	aragonite	
1160	9,1	0,20	aragonite + calcite	
1240	14,6	0,32	aragonite + calcite	
1300	11,1	0,46	aragonite + calcite	
1350	12,1	0,42	aragonite + calcite	
1410	12,6	0,58	calcite+Mg calc+dolomite	
1683	1,5	0,13	calcite	
1710	12,6	0,88	calcite + dolomite	3ème niveau lacustre
1790	11,6	0,94	calcite + dolomite	
2230	24,7	0,23	dolomite	
2290	0,0	0,12		4ème niveau lacustre
2370	11,6	0,19	Mg calcite	
2495	13,8	0,44	Mg calcite	
2560	5,6	0,40	Mg calcite	
2627	11,7	0,39	calcite + Mg calcite	
2695	20,9	0,23	Mg calcite	
2765	16,8	0,47	Mg calcite	
2830	22,4	0,28	Mg calcite	
2890	14,8	0,14	Mg calcite	
2945	16,8	0,11	Mg calcite	
2990	11,2	0,12	Mg calcite	
3060	13,3	0,12	Mg calcite	
3130	12,0	0,12	Mg calcite	
3225	13,0	0,20	calcite + Mg calcite	
3285	3,1	0,35	calcite + dolomite	
3340	20,3	0,28	calcite	
3400	21,9	0,27	calcite + Mg calcite	
3460	14,6	0,37	calcite + Mg calcite	
3530	27,6	0,56	calcite + Mg calcite	
4155	9,4	0,12	Mg calcite	
4210	20,8	0,52	aragonite + Mg calcite	
4340	12,0	0,20	calcite	
4645	16,7	0,30	calcite + dolomite	
4675	2,1	0,05	Mg calcite	
5355	3,1	2,58	calcite	6ème niveau halitique
5405	15,6	0,29	calcite	6ème niveau lacustre
5465	1,0	0,17	calcite	
5540	14,6	0,15	dolomite	
5605	3,6	0,07	dolomite	
5680	0,0	0,10		
6195	3,1	0,45	Mg calcite	
6260	7,3	0,40	Mg calcite + tr dolomite	
6310	6,8	0,49	calcite	
6380	4,7	0,36	calcite + dolomite	
6435	0,0	0,30		
6510	1,0	0,44	Mg calcite	
6750	9,9	0,23	Mg calcite + dolomite	8ème niveau lacustre
6800	0,0	0,04		
7260	4,2	0,72	calcite	9ème niveau lacustre
7310	5,7	0,30	Mg calcite	
7370	1,0	0,12	Mg calcite	

Niveau	MO/10g	COT	MOA	MOF	M+P	Pyrite RX	Magnétite RX	niveau stratigraphique
640	0,33	0,79	0,19	0,12	0,02	?	xx	1er niveau lacustre
840	0,50	0,32	0,17	0,02	0,31	x	?	2ème niveau lacustre
910	0,42	0,41	0,24	0,03	0,15	x	xx	
960	0,25	0,35	0,03	0,00	0,22		xx	
1050	0,50	0,53	0,25	0,06	0,19		?	
1110	0,50	0,51	0,36	0,04	0,10		xx	
1160	0,20	0,20	0,05	0,05	0,10	?	xx	
1240	0,33	0,32	0,17	0,04	0,12	x		
1300	0,33	0,46	0,05	0,05	0,23		xx	
1350	0,33	0,42	0,17	0,11	0,05		xx	
1410	0,50	0,58	0,21	0,08	0,21	xx	xx	
1683	0,13	0,13	0,07	0,05	0,01			3ème niveau lacustre
1710	0,60	0,88	0,38	0,15	0,07	x		
1790	0,50	0,94	0,42	0,08	0,00			
2230	0,10	0,23	0,03	0,03	0,04			4ème niveau lacustre
2290	0,12	0,10	0,08	0,01	0,03			
2370	0,20	0,19	0,16	0,02	0,02			
2495	0,35	0,44	0,28	0,04	0,03			
2560	0,35	0,40	0,30	0,03	0,02		xx	
2627	0,50	0,39	0,42	0,08	0,00			
2695	0,50	0,23	0,38	0,06	0,06		xx	
2765	0,50	0,47	0,28	0,06	0,16		xx	
2830	0,33	0,28	0,22	0,06	0,05		xx	
2890	0,13	0,14	0,03	0,02	0,08	xx	xx	
2945	0,20	0,11	0,02	0,02	0,16	x	xx	
2990	0,20	0,12	0,01	0,03	0,16	xxx	xx	
3060	0,10	0,12	0,03	0,03	0,04		xx	
3130	0,20	0,12	0,08	0,03	0,09		xx	
3225	0,20	0,20	0,03	0,03	0,14			
3240	0,10	0,35	0,03	0,02	0,05		xx	
3285	0,20	0,28	0,04	0,04	0,12		?	
3400	0,30	0,27	0,03	0,03	0,24	xx		
3460	0,10	0,37	0,04	0,01	0,05			
3530	0,20	0,56	0,08	0,10	0,02			
4155	0,10	0,12	0,05	0,00	0,05	xx	x	5ème niveau lacustre
4210	0,20	0,52	0,18	0,00	0,02	x	xx	
4340	0,10	0,20	0,03	0,01	0,06			
4645	0,10	0,30	0,05	0,00	0,05		xx	
4675	0,10	0,05	0,05	0,00	0,05		xx	6ème niveau halitique
5355	2,00	2,58	1,83	0,17	0,00		xx	6ème niveau lacustre
5405	0,15	0,29	0,00	0,03	0,12	xx		
5465	0,50	0,17	0,08	0,08	0,34	xxx	xx	
5540	0,16	0,15	0,01	0,02	0,13			
5605	0,10	0,07	0,03	0,00	0,07			
5680	0,08	0,10	0,07	0,01	0,00			
6195	0,33	0,45	0,18	0,01	0,14	x		7ème niveau lacustre
6260	0,33	0,40	0,04	0,04	0,25	xx	?	
6310	0,40	0,49	0,07	0,07	0,26	?	?	
6380	0,33	0,36	0,13	0,07	0,13		xx	
6435	0,28	0,30	0,04	0,04	0,20	xxx	xxx	
6510	0,20	0,44	0,07	0,07	0,06		xxx	
6750	0,10	0,23	0,05	0,00	0,05	x		8ème niveau lacustre
6800	0,04	0,04	0,02	0,00	0,02		xxx	
7260	0,12	0,72	0,12	0,00	0,00		xxxx	9ème niveau lacustre
7310	0,10	0,30	0,10	0,00	0,00			
7370	0,06	0,12	0,04	0,02	0,00			

Les colonnes "pyrite RX" et "magnétite RX" indiquent les niveaux où ces minéraux sont suspectés (?), ou présents, en plus ou moins grandes quantités (x....) d'après les données de diffractométrie



## ANNEXE 3

Prof. cm	MO/10g total	Pollen-spores	<i>Pediastrum</i>	<i>Botryococcus</i>	<i>Incertae sedis</i>	niveau stratigraphique
640	0,33	-	20 000	-	20 000	1er niveau lacustre
840	0,50	-	22 500	-	17 500	2ème niveau lacustre
910	0,42	-	5 000	-	25 000	
960	0,25	750	4 000	-	2 000	
1050	0,50	1 500	4 000	750	4 000	
1110	0,50	750	-	-	4 000	
1160	0,20	-	750	-	2 000	
1240	0,33	2 000	2 000	1 000	3 000	
1300	0,33	1 000	3 000	-	2 000	
1350	0,33	3 000	3 000	-	1 000	
1410	0,50	2 500	4 500	-	8 000	
1683	0,13	-	1 000	-	-	
1710	0,60	-	5 000	-	8 000	3ème niveau lacustre
1790	0,50	-	3 000	-	5 000	
2230	0,10	10 000	45 000	-	7 000	4ème niveau lacustre
2290	0,12	-	-	-	-	
2370	0,20	5 000	1 000	-	-	
2495	0,35	3 700	30 000	750	-	
2560	0,35	2 200	7 500	-	-	
2627	0,50	4 500	7 500	1 500	-	
2695	0,50	3 000	4 000	-	-	
2765	0,50	3 000	3 000	-	-	
2830	0,33	3 000	20 000	-	-	
2890	0,13	1 000	10 000	-	-	
2945	0,20	7 500	4 500	-	-	
2990	0,20	4 000	2 000	-	-	
3060	0,10	1 500	4 500	-	-	
3130	0,20	1 500	3 000	-	-	
3225	0,20	1 500	1 500	-	-	
3240	0,10	2 000	1 000	-	-	
3285	0,20	1 500	6 000	-	-	
3400	0,30	4 000	3 000	2 000	-	
3460	0,10	-	1 000	1 000	-	
3530	0,20	1 500	-	4 500	-	
4155	0,10	-	-	750	-	
4210	0,20	-	-	-	-	
4340	0,10	-	-	-	-	
4645	0,10	-	-	-	-	
4675	0,10	-	-	-	-	5ème niveau lacustre
5355	2,00	3 000	-	-	-	6ème niveau lacustre
5405	0,15	1 200	600	300	-	
5465	0,40	800	800	-	-	
5540	0,16	1 000	500	-	-	
5605	0,14	500	1 000	-	-	
5680	0,08	400	-	-	-	
6195	0,33	2 500	500	-	1 500	7ème niveau lacustre
6260	0,33	2 000	1 000	1 000	2 000	
6310	0,30	5 000	20 000	1 000	5 000	
6380	0,33	2 000	12 000	1 000	2 000	
6435	0,28	1 500	10 000	600	2 500	
6510	0,10	1 500	15 000	700	1 500	
6750	0,20	1 500	3 000	-	500	8ème niveau lacustre
6800	0,04	-	-	-	-	
7260	0,08	-	-	-	-	
7310	0,10	-	-	-	-	9ème niveau lacustre
7370	0,06	-	-	-	-	

## ANNEXE a

Prof.	Porosité	Calcite	Détritique	Halite	Gypse	Total	
0	-	0	0	91,28	2,72	94	1er niveau halitique
50	-	0	0,51	93,93	1,23	95,67	
100	-	0	1,02	95,41	1,66	98,09	
150	-	0	1,52	85,23	11,6	98,35	
200	-	0	2,05	86,12	8,65	96,82	
250	-	0	1,85	86,6	5,91	94,36	
300	-	0	1,52	92,96	3,45	97,93	
345	-	0	1,33	95,86	1,2	98,39	
400	-	0	1,02	93,8	2	96,82	
450	-	0	0,51	97,55	1,26	99,32	
505	-	0	0,51	95,05	1,19	96,75	
550	-	0	0,51	94,86	1,85	97,22	
610	32,71	5,89	4,82	3,57	68,64	82,92	
650	60,96	8,56	9,78	0	47,8	66,14	
700	-	0	0	94,23	2,32	96,55	2ème niveau halitique
750	-	0	0	97,59	1,38	98,97	
800	-	0	0	93,87	4,43	98,3	
850	58,32	10,12	49,4	9,38	20,84	89,74	2ème niveau lacustre
900	69,33	16,13	57,41	0	8,46	82	
935	69,43	17,39	55,38	0	12,21	84,98	
1050	73,57	19,25	51,12	0	9,81	80,18	
1100	71,86	18,35	50,46	1,67	6,88	77,36	
1150	72,22	19,62	45,06	0	5,7	70,38	
1200	68,6	26,65	49,5	2,72	0	78,87	
1250	55,29	13,71	29,62	0,54	38,42	82,29	
1300	68,6	19,04	54,97	4,52	7,55	86,08	
1350	64,18	21,18	42,85	0	15,4	79,43	
1400	62,19	19,66	48,25	6,4	16,95	91,26	
1450	-	0	0	97,93	1,58	99,51	3ème niveau halitique
1530	-	0	1,53	96,81	1,69	100,03	
1600	-	0	0	97,3	1,52	98,82	
1635	-	0,78	15,17	84,65	5,49	106,09	
1700	29,98	1,33	25,51	81,58	3,25	111,67	3ème niveau lacustre
1740	6,33	0	13,13	96,15	2,38	111,66	
1760	64,68	14,28	21,73	6,12	15,72	57,85	
1800	65,76	20,98	36,84	15,11	3,29	76,22	
1925	-	0	1,81	96,09	1,74	99,64	4ème niveau halitique
1980	-	0	1,53	98,87	1,35	101,75	
2040	-	0	1,01	96,91	1,63	99,55	
2075	-	0	1,03	98,7	1,7	101,43	
2130	-	0	0,5	92,91	6,6	100,01	
2160	-	0	0,5	97,26	1,34	99,1	
2195	-	10,49	0,57	63,19	5,7	79,95	
2230	58,05	27,06	6,53	9,74	13,29	56,62	4ème niveau lacustre
2280	45,46	6,14	9,82	1,08	49,09	66,13	
2330	30,41	1,6	4,37	67,66	17,47	91,1	
2380	67,42	43,13	31,25	3,93	0	78,31	
2470	33,99	5,09	6,42	0,3	70,92	82,73	
2500	54,22	18,24	46,75	1,28	11,8	78,07	
2550	55,02	12,69	24,23	0	43,59	80,51	
2600	70,2	26,3	36,04	0	3,26	65,6	
2650	15,97	0,77	7,19	82,17	11,91	102,04	
2700	56,43	28,86	36,94	9,12	10,83	85,75	
2750	44,52	22,97	21,76	35,8	7,34	87,87	
2800	51,76	28,04	30,53	12,26	10,32	81,15	
2850	55,26	19,03	25,95	12,22	19,24	76,44	
2900	63,4	20,14	46,74	4,47	12,33	83,68	

ANNEXE a

Prof.	Porosité	Calcite	Détritique	Halite	Gypse	Total	
2950	63,76	20,08	45,07	4,42	9,52	79,09	4ème niveau lacustre
3000	47,48	8,57	57,47	0,87	49,19	116,1	
3010	67,46	17,49	56,25	2,03	0	75,77	
3050	67,88	15,89	48,53	2,05	13,08	79,55	
3100	45,76	11,79	28,03	53,19	9,88	102,89	
3150	57,66	18,73	36,53	0,96	31,53	87,75	
3200	64,56	17,1	43,37	3,28	19,09	82,84	
3250	56,16	12,35	26,21	0,93	52,11	91,6	
3290	51,19	2,28	7,53	8,7	43,02	61,53	
3350	73,04	54,01	41,22	3,93	0	99,16	
3400	64,95	20,59	68,13	0,87	0	89,59	
3450	67,84	25,6	52,55	1,15	12,39	91,69	
3500	68,84	32,88	39,48	2,07	7,61	82,04	
3570	-	0	0,61	99,51	1,83	101,95	
3800	-	0	1,5	95,07	3,96	100,53	
4050	-	0	1,42	99,23	1,39	102,04	
4100	-	0	1,32	93,87	5,39	100,58	
4150	36,94	2,59	5,18	21,63	63,88	93,28	5ème niveau lacustre
4200	55,88	26,24	11,15	0,69	51,23	89,31	
4234	31,31	15,06	0,21	0,92	81,08	97,27	
4334	60,83	17,59	35,89	0	42,69	96,17	
4500	67,11	5,01	43,94	32,57	8,49	90,01	
4615	56,84	1,84	73,53	11,93	5,83	93,13	
4670	32,89	6,17	6,49	11,62	64,94	89,22	
4688	-	0	2,27	95,02	2,15	99,44	6ème niveau halitique
4720	-	3,13	4,81	83,71	2,17	93,82	
4780	-	0	1,93	96,52	2,75	101,2	
4870	-	0	1,96	98,3	1,85	102,11	
4965	-	0	3,16	54,84	41,43	99,43	
5050	-	0	1,97	92,51	6,42	100,9	
5155	-	0	6,44	96,15	2,37	104,96	
5370	39,44	0	13,06	3,7	75,76	92,52	6ème niveau lacustre
5420	51,02	8,55	37,7	13,18	24,35	83,78	
5470	50,67	2,45	74,96	2,75	7,91	88,07	
5520	50,31	5,34	67,17	1,14	12,5	86,15	
5570	67,07	6,11	71,88	1,67	5,64	85,3	
5600	50,24	11,42	39,31	0,14	37,36	88,23	
5650	42,49	0	39,83	0	49,94	89,77	
5700	48,91	0	10,07	23,94	70,81	104,82	
5825	-	0	2,78	97,1	3,15	103,03	7ème niveau halitique
5950	-	0	6,8	55,51	41,78	104,09	
5970	-	0	3,78	40,54	56,6	100,92	
6160	-	0	1,32	76,29	23,07	100,68	
6200	73,45	8,14	63,26	6,26	5,57	83,23	7ème niveau lacustre
6250	49,13	3,14	14,34	23,27	50,35	91,1	
6300	68,85	12,24	58,28	0	17,12	87,64	
6360	69,15	8,92	53,75	5,96	12,49	81,12	
6400	70,08	6,97	69,49	0,25	7,62	84,33	
6450	44,23	0	40,15	0,96	45,4	86,51	
6500	44,03	0	43,8	2,05	43,56	89,41	
6720	10,43	0	0,2	95,61	4,73	100,54	
6750	72,92	18,94	63,3	0	0	82,24	8ème niveau lacustre
6800	42,61	0,53	8,35	1,33	80,94	91,15	
6970	-	0	11,52	82,63	4,61	98,76	9ème niveau halitique
6990	-	0	13,1	47,88	26,88	87,86	

Prof. cm	% résidu	C‰	N ‰	C/N	
0	0,00				
50	traces				
100	0,32	0,114	0,012	9,30	
150	0,83	0,130	0,011	12,40	
200	1,17	0,416	0,048	8,60	
250	0,30	0,127	0,010	13,20	
300	0,00				
345	0,00				
400	0,00				
450	0,00				
505	0,00				
550	0,00				
610	42,70	2,524	0,263	9,60	
630	35,50	4,505	0,372	12,10	
650	52,90	2,643	0,226	11,70	
700	0,00				
750	0,00				
800	0,00				
850	50,20	4,489	0,406	11,10	
900	45,30	5,999	0,578	10,40	
935	46,60	5,480	0,511	10,70	
1050	48,10	5,670	0,580	9,80	
1100	45,10	8,251	0,569	14,50	
1150	45,70	4,019	0,477	8,40	
1200	44,90	4,056	0,559	7,30	
1250	57,50	2,447	0,325	7,50	
1300	42,80	5,115	0,571	9,00	
1350	46,40	3,770	0,505	7,50	
1400	43,90	5,749	0,789	7,30	
1450	0,36	0,074	0,008	9,30	
1530	0,00				
1600	0,00				
1635	8,80	1,273	0,143	8,90	
1700	23,00	3,499	0,308	11,40	
1740	20,00	3,126	0,285	11,00	
1760	24,10	4,289	0,433	9,90	
1800	36,30	6,719	0,528	12,70	
1925	traces				
1980	0,00				
2040	0,00				
2075	0,00				
2130	0,00				
2160	0,00				
2195	1,40	0,566	0,041	13,80	
2230	48,60	6,701	0,580	11,60	
2255	51,80	4,785	0,383	12,50	
2280	41,90	2,595	0,250	10,40	
2330	3,50	0,748	0,062	12,10	
2355	39,30	1,314	0,107	12,30	
2380	31,30	13,659	1,233	11,10	
2470	39,40	2,646	0,188	14,10	
2485	29,60	3,276	0,246	13,30	
2500	50,10	5,941	0,418	14,20	
2550	33,80	4,182	0,325	12,90	
2600	42,80	4,879	0,469	10,40	
2625	37,30	6,413	0,475	13,50	
2650	6,40	1,553	0,098	15,80	
2675	37,20	3,123	0,244	12,80	
2700	35,50	2,993	0,286	10,50	
2750	22,40	2,752	0,226	12,20	
2800	33,20	4,739	0,407	11,60	
2850	28,90	4,031	0,327	12,30	
2900	40,20	4,390	0,399	11,00	
2950	42,00	3,858	0,376	10,30	
3000	39,30	3,205	0,383	8,40	
3010	52,70	3,292	0,295	11,20	
3050	41,70	3,664	0,341	10,70	
3100	22,80	2,099	0,220	9,50	
3150	32,20	4,782	0,395	12,10	
3200	34,90	3,284	0,369	8,90	
3250	31,40	3,104	0,290	10,70	
3300	4,50	0,521	0,059	8,80	
3350	27,60	17,194	1,494	11,50	
3400	57,50	5,068	0,451	11,20	
3450	41,90	4,617	0,439	10,50	
3500	34,60	7,469	0,658	11,40	
3570	0,26	0,103	0,006	17,20	
3800	1,60	0,256	0,019	13,50	
4050	0,00				
4100	0,12	0,051	0,003	17,00	
4150	31,90	1,413	0,113	12,50	
4200	21,90	1,885	0,144	13,10	
4234	35,50	1,834	0,122	15,00	
4334	35,70	4,128	0,357	11,60	
4500	29,10	2,201	0,135	16,30	
4615	57,00	0,810	0,062	9,90	
4630	36,80	4,543	0,399	11,40	
4670	35,80	1,947	0,149	13,10	
4688	2,10	0,185	0,026	7,10	

**PLANCHES**

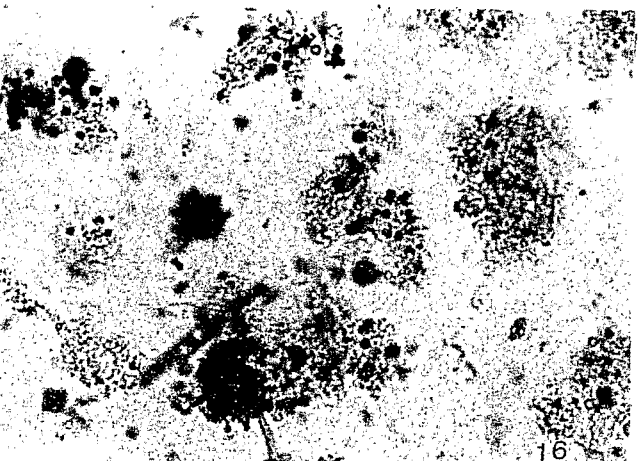
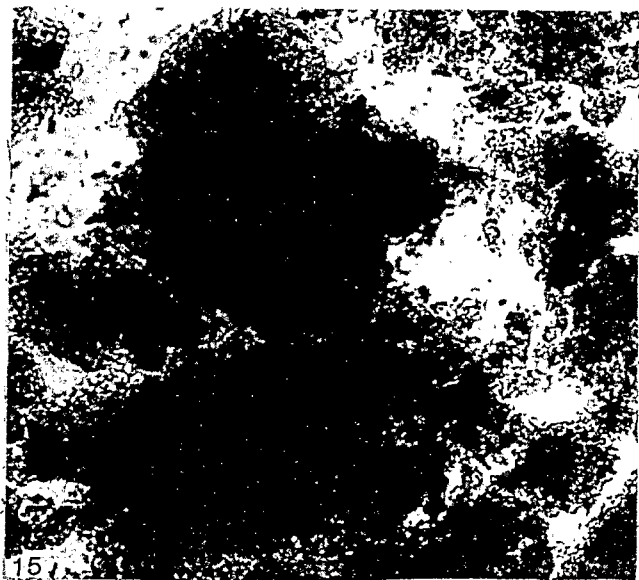
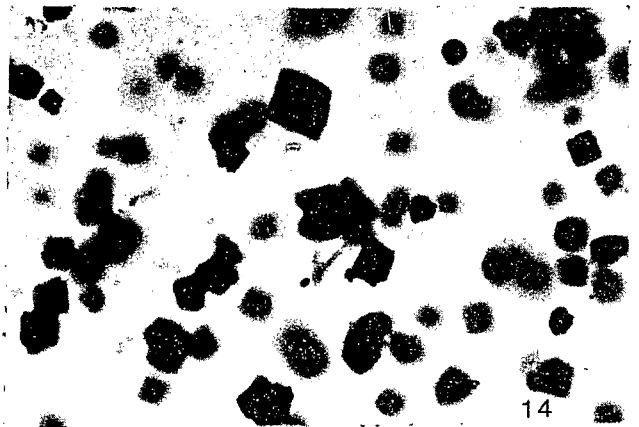
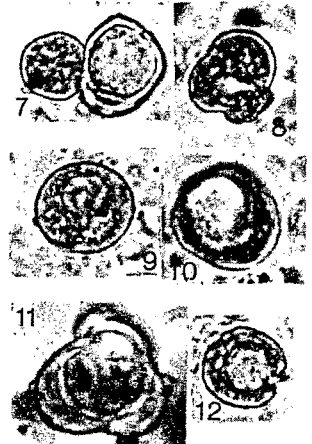
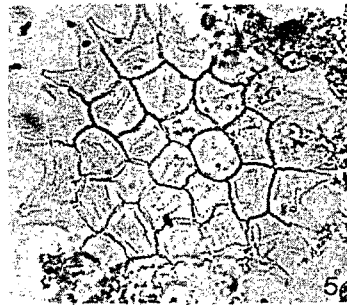
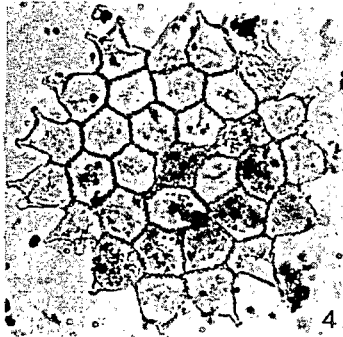
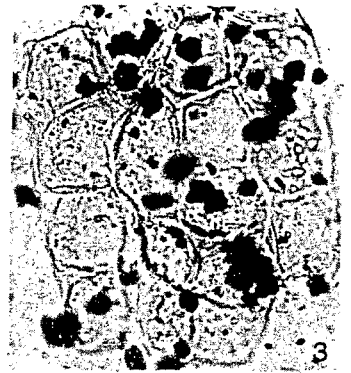
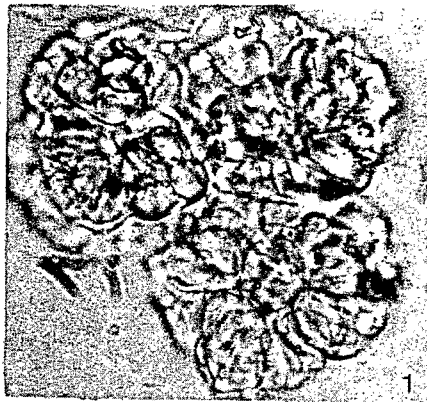
*PLATES*

## PLANCHE I / PLATE I

- 1 *Botryococcus* (65,10 m)
- 2 *Pediastrum* (54,05 m)
- 3 *Pediastrum* (9,10 m)
- 4 *Pediastrum* (11,60 m)
- 5 *Pediastrum* (6,40 m)
- 6 Cristaux de magnétite ou de pyrite. *Magnetite or pyrite crystals*  
(28,90 m)
- 7 *Incertae sedis* (6,40 m)
- 8 *Incertae sedis* (niveau 6,40 m)
- 9 *Incertae sedis* (8,40 m)
- 10 *Incertae sedis* (14,10 m)
- 11 *Incertae sedis* ((8,40 m)
- 13 Palynofaciès (26,95 m)
- 14 Cristaux de magnétite ou de pyrite. *Magnetite or pyrite crystals*  
(29,55 m)
- 16 Palynofaciès (34,00 m)

Grossissement : x 1000 sauf fig. 6, 13, 15 et 16 : x 500

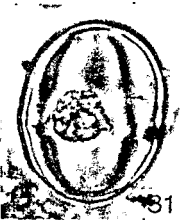
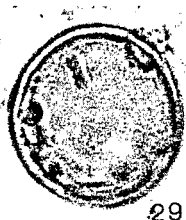
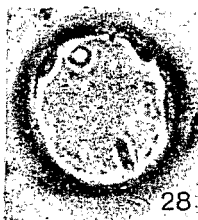
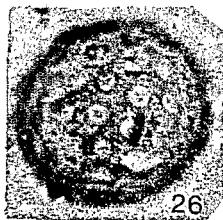
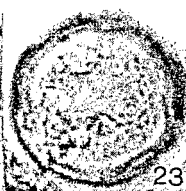
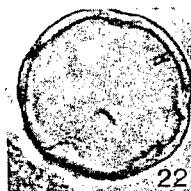
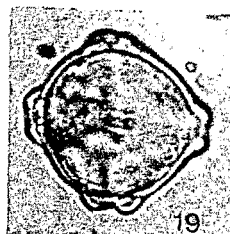
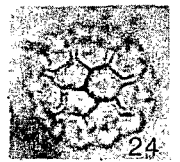
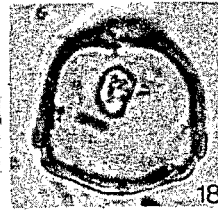
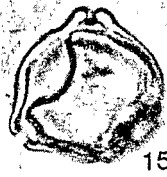
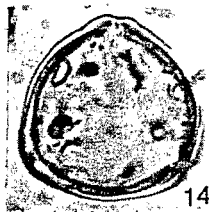
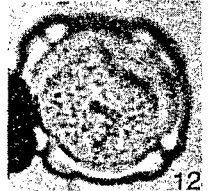
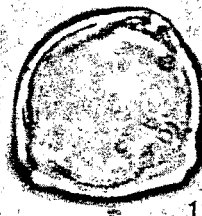
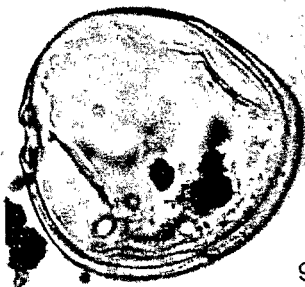
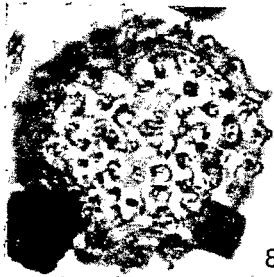
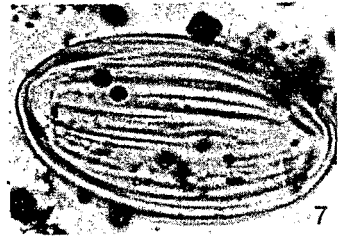
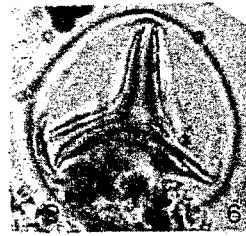
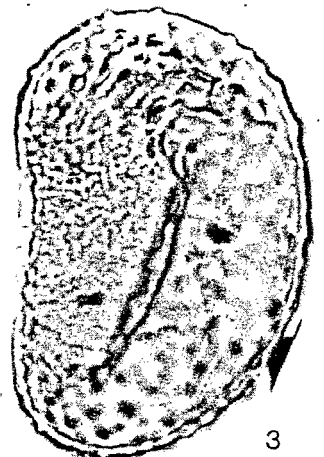
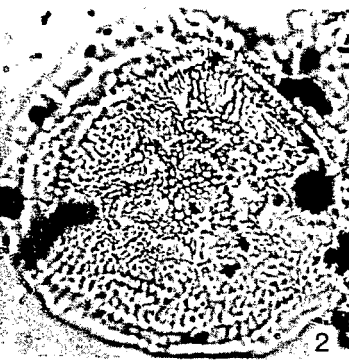
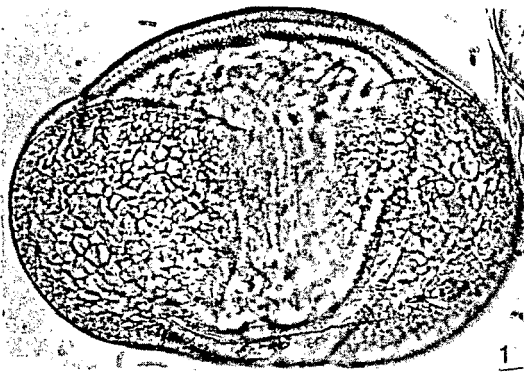
Magnification : x 1000 excepted fig. 6, 13, 15 and 16 : x 500



## PLANCHE II / PLATE II

- |       |  |
|-------|--|
| 1     | Pinaceae type <i>Picea</i> (12,40 m)           |
| 2     | Passifloraceae ? (14,10 m)                     |
| 3     | Polypodiaceae (12,40 m)                        |
| 4     | Podocarpaceae : <i>Dacrydium</i> (62,60 m)     |
| 5     | Podocarpaceae : <i>Podocarpus</i> (62,60 m)    |
| 6     | Salviniaceae : <i>Azolla</i> (34,00 m)         |
| 7     | Ephedraceae : <i>Ephedra</i> (62,60 m)         |
| 8     | Hydrocharidaceae (29,90 m)                     |
| 9     | Graminae (13,00 m)                             |
| 10    | Graminae (12,40 m)                             |
| 11    | Myricaceae : <i>Myrica</i> (13,50 m)           |
| 12-13 | Haloragaceae : <i>Myriophyllum</i> (34,00 m m) |
| 14    | Betulaceae : <i>Corylus</i> (61,95 m)          |
| 15    | Betulaceae : <i>Betula</i> (63,80 m)           |
| 16-17 | Leguminosae Papilionaceae (26,95 m)            |
| 18    | Myricaceae : <i>Myrica</i> (61,95 m)           |
| 19    | Betulaceae : <i>Alnus</i> (54,65 m)            |
| 20    | Betulaceae : <i>Alnus</i> (34,00 m)            |
| 21    | Haloragaceae : <i>Myriophyllum</i> (65,10 m)   |
| 22-23 | Pollen périporé - Periporate pollen (34,00 m)  |
| 24-25 | Amaranthaceae (34,00 m)                        |
| 26    | Chenopodiaceae : <i>Chenopodium</i> (61,95 m)  |
| 27    | Chenopodiaceae : <i>Chenopodium</i> (10,50 m)  |
| 28-29 | Haloragaceae : <i>Haloragis</i> (54,05 m)      |
| 30-31 | Leguminosae Papilionaceae (10,50 m)            |





## PLANCHE III / PLATE III

- |          |   |
|----------|---|
| 1-2      | Pollen tricolporé. <i>Tricolporate pollen</i> (61,95 m) |
| 3-4      | Labiatae (28,90 m)                                      |
| 5        | Pollen tricolporé. <i>Tricolporate pollen</i> (62,60 m) |
| 6        | Compositae (12,40 m)                                    |
| 7-8      | Rosaceae (26,27 m)                                      |
| 9        | Convolvulaceae (29,45 m)                                |
| 10-11    | Compositae (28,30 m)                                    |
| 12-13    | Verbenaceae (55,40 m)                                   |
| 14-15    | Compositae (61,95 m)                                    |
| 16-17    | Compositae (28,90 m)                                    |
| 18-19    | Compositae (61,95 m)                                    |
| 20-21    | Compositae (10,50 m)                                    |
| 22-23    | Caryophyllaceae (29,45 m)                               |
| 24-25    | Caryophyllaceae (61,95 m)                               |
| 26-27    | Rosaceae type <i>Polylepis, Acaena...</i> (28,90 m)     |
| 28-29    | Rosaceae type <i>Polylepis, Acaena...</i> (10,50 m)     |
| 30-31    | Rosaceae type <i>Polylepis, Acaena...</i> (34,00 m)     |
| 32       | Rosaceae type <i>Polylepis, Acaena...</i> (54,05 m)     |
| 33       | Umbelliferae (28,30 m)                                  |
| 34-35-36 | Umbelliferae (61,95 m)                                  |

Grossissement : x 1000

Magnification : x 1000

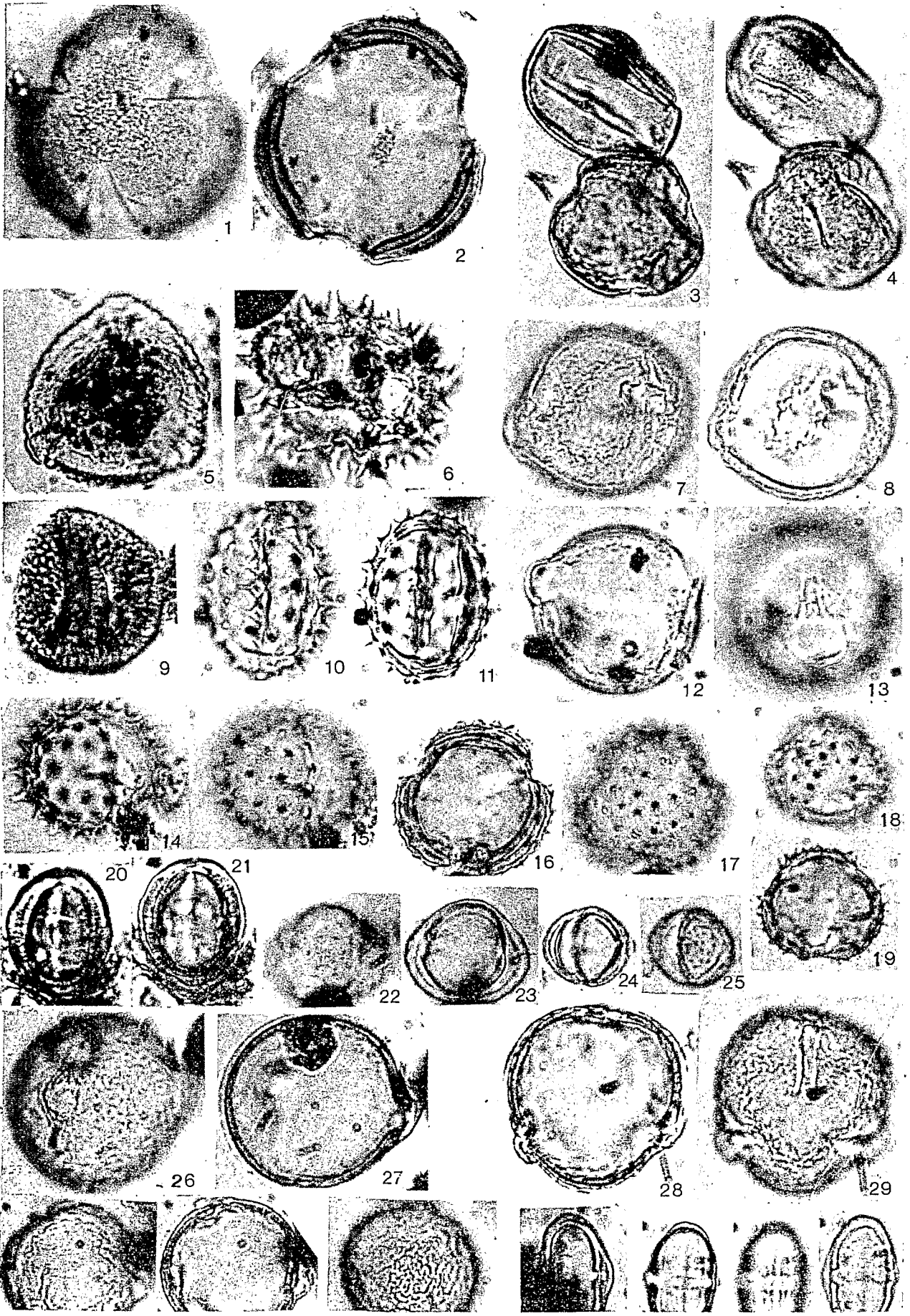


PLANCHE IV - MICROFACIÈS DE LA HALITE (LUMIÈRE NATURELLE)

PLATE IV - HALITE MICROFACIES (PLANE POLARIZED LIGHT)

1 - Première couche halitique (échantillon UA 25) : très forte porosité, matérialisée par un réseau de vides subverticaux - barre = 1 cm. *Near-surface part of the first halite layer (UA 25 sample) : high porosity with vertically aligned voids - scale bar is 1 cm long*

2 - Détail de la photo précédente ; remarquer les surfaces sombres onduleuses correspondant au piégeage de sédiment (poussières éoliennes ?) lors de l'assèchement périodique du salar (recristallisation de la halite) ainsi que les amas de petits cristaux au sein d'un vide de dissolution - barre = 2 mm. *Close-up of precedent thin section photograph. Note the dark wavy surfaces corresponding to eolian dust? trapped in halite ; detrital crystals accumulations are also present at the bottom of some voids - scale bar is 2 mm long*

3 - Première couche halitique (échantillon UA 290) : faciès en chevrons. Les vides subverticaux se situent préférentiellement en limite de cristaux ; remarquer également les zones de halite limpide en doigt de gant (flèche) correspondant à la dissolution, puis à la recristallisation de la halite - barre = 1 cm. *First (near-surface) halite layer (UA 290 sample) - Vertically oriented chevron halite crystals. Truncation by dissolution and cementation by clear halite is clearly shown by the small finger (arrow) of clear halite that truncates fluid inclusion banding - scale bar is 1 cm long*

4 - Deuxième couche halitique (échantillon UA 720) : halite litée montrant une alternance de niveaux centimétriques de trémies et de niveaux millimétriques de halite détritique résultant de la déflation éolienne - barre = 1 cm. *Second halite layer (UA 720 sample) - bedded halite showing cm-thick hopper crystals and mm-thick detrital halite resulting from wind reworking of surficial halite crusts - scale bar is 1 cm long*

5 - Troisième couche halitique (échantillon UA 1440) : faciès en chevrons, nombreux vides et recristallisation de halite limpide en périphérie de cristaux - barre = 1 cm. *Third halite layer (UA 1440 sample) - vertically oriented chevron crystals with abundant dissolution features including voids ; the fluid-inclusion banded halite is commonly truncated and surrounded by clear halite - scale bar is 1 cm long*

6 - Détail de la photo précédente ; remarquer les zones en doigt de gant de halite limpide (flèche) ainsi que les cristaux de gypse millimétriques recristallisant en bordure des cristaux - barre = 2 mm. *Close-up of precedent thin section photograph. Note the small finger (arrow) of clear halite that truncates fluid inclusion banding and the mm-long gypsum crystals at the border of halite - scale bar is 2 mm long*

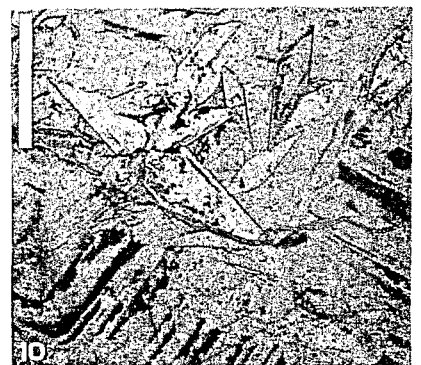
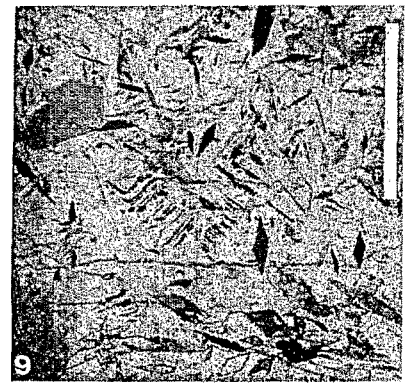
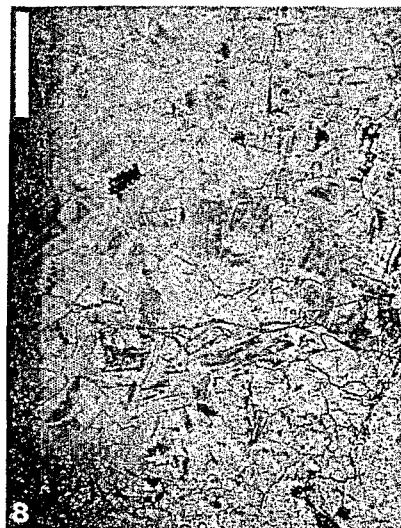
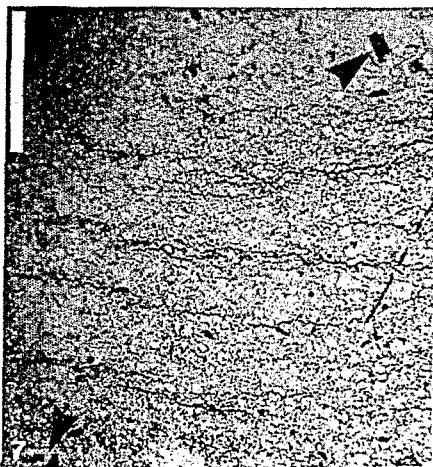
7 - Quatrième couche halitique (échantillon UA 2150) : halite litée limpide à grain fin ; remarquer que des structures primaires sont visibles au sein de la halite en cristaux de plus grande taille - barre = 5 mm. *Fourth halite layer (UA 2150 sample) - fine-grained bedded halite ; some banding is visible in coarser crystals - scale bar is 5 mm long*

8 - Cinquième couche halitique (échantillon UA 4100) : faciès en trémies plus ou moins recristallisées - barre = 5 mm. *Fifth halite layer (UA 4100 sample) - more or less recrystallized hopper crystals - scale bar is 5 mm long*

9 - Onzième couche halitique (échantillon UA 10060) : faciès halitique compact à nombreux cristaux de gypse lenticulaire - barre = 1 cm. *Eleventh halite layer (UA 10060 sample) - massive halite with numerous gypsum crystals - scale bar is 1cm long*

10 - Détail de la photo précédente ; remarquer le gypse secondaire en rosette, en bordure des cristaux de halite à structure primaire partiellement préservée - barre = 1 mm. *Close-up of precedent thin section photograph. Note the secondary gypsum rosette at the border of halite - scale bar is 1 mm long*





BULLETIN

1995

Tome 48, Fascicule 4

ISSN 0302-2692

---

# SCIENCES GÉOLOGIQUES

---

PALYNOLOGIE

*PALYNOLOGY*

---