

BIBLIOGRAPHIE

- DANSGAARD (W.). 1964. — Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, XVI : 435-468.
- FERHI (A.). 1980. — Variation des teneurs en oxygène 18 de la matière organique d'origine végétale. Application à l'étude des paléoenvironnements. *Thèse doctorat d'État*, Univ. P. et M. Curie, Paris VI. 233 p.
- FONTES (J.Ch.), LETOLLE (R.), OLIVE (Ph.), BLAVOUX (B.). 1967. — Oxygène 18 et Tritium dans le bassin d'Évian. In « Isotopes in Hydrology ». *Proceed. Symp.*, I.A.E.A., Vienna : 401-405.
- GOUZE (Ph.). — Reconstitution paléoclimatique du Quaternaire récent de Bolivie. Approches géologique et isotopique. (Thèse Univ. Orsay, en préparation).
- OSTRIA (C.). — Phytoécologie et paléoécologie d'une vallée glaciaire alto-andine. Hichu-Kkota (Cordillère Orientale, Bolivie). (Thèse Univ. P. et M. Curie, en préparation).

## Diatomées et milieux aquatiques de Bolivie Application des méthodes statistiques à l'évaluation des paléotempératures et des paléosalinités

M. ROUX<sup>(1)</sup>, S. SERVANT-VILDARY<sup>(2)</sup>, S. MELLO E SOUSA<sup>(3)</sup>

Deux études ont été conduites avec des méthodes semblables. La première avait pour but d'évaluer la paléosalinité d'un lac du Pléistocène supérieur, situé dans la région des « Salars », Sud Lipez ; la deuxième était destinée à évaluer les paléotempératures à l'Holocène récent, à partir de la coupe Wila Llojeta, située au sommet de la vallée d'Hichu Kkota, dans la Cordillère orientale des Andes. La méthode consiste à comparer les flores actuelles et les flores fossiles de diatomées, provenant d'une même aire géographique d'extension restreinte.

Les méthodes statistiques employées sont, d'une part, la régression linéaire multiple, d'autre part, la régression par les plus proches analogues. Cependant pour limiter les instabilités liées aux erreurs d'échantillonnage et de détermination des espèces, une analyse factorielle des correspondances est pratiquée au préalable ; elle permet, en outre, de valider l'échantillon actuel en relation avec l'échantillon fossile étudié. C'est ainsi que, dans le cas des salars, cette étape préalable a conduit à utiliser préférentiellement la régression linéaire classique ; le point crucial de cette étude est l'effectif restreint des échantillons actuels.

On abordera successivement les points de méthodologie puis l'interprétation paléoclimatique que l'on peut tirer des évaluations de la salinité et de la température.

### Méthodologie

#### ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES

Initialement conçue pour traiter les tableaux de contingence « croisant » deux variables qualitatives, l'analyse des correspondances se révèle fort utile pour étudier tous les tableaux contenant des effectifs, comme c'est le cas des relevés floristiques. Elle fournit une représentation approchée des relevés en fonction des différentes proportions des espèces qu'ils contiennent, ainsi que des espèces en fonction de leur répartition dans les différents relevés. Certains éléments, appelés passifs ou supplémentaires, peuvent être temporairement mis de côté dans l'analyse, ce sera le cas des relevés fossiles, ils sont ensuite replacés après traitement auprès des éléments actifs en fonction de leur composition floristique.

L'intérêt de l'AFC dans le cas présent est triple : les coordonnées factorielles sont très stables par rapport à des erreurs d'échantillonnage ou de détermination ; ensuite un petit nombre de coordonnées factorielles rendent compte des fluctuations de nombreuses espèces ; enfin elle permet de contrôler la validité de l'échantillon actuel pour inférer des résultats sur les relevés fossiles.

#### LA RÉGRESSION LINÉAIRE MULTIPLE

Cette méthode classique consiste à évaluer la varia-

(1) CNRS, Route de Mende, B.P. 5051, 34033 Montpellier Cedex (Programme GEOCIT).

(2) ORSTOM, Muséum national d'Histoire naturelle, 43, rue Buffon, 75005 Paris.

(3) Instituto de Geociencias, Universidade de Sao Paulo, Caixa Postal 20899, São Paulo, Brésil.

ble Y à estimer (salinité, température...) à l'aide d'une formule du 1<sup>er</sup> degré en l'abondance des espèces.

$$Y = a_0 + a_1 S_1 + a_2 S_2 + \dots + a_p S_p$$

(S1, S2... Sp représentant les abondances des espèces).

Elle suppose implicitement une relation continue et monotone (toujours de même sens) entre la variable à estimer et les abondances des différentes espèces, ce qui la conduit à minimiser le rôle des espèces à amplitude écologique étroite, en revanche elle peut interpoler convenablement les valeurs relatives à des relevés n'ayant pas d'analogues actuels corrects.

#### RÉGRESSION PAR LES PLUS PROCHES ANALOGUES

Pour tout échantillon fossile on examine les K échantillons actuels qui lui ressemblent le plus, du point de vue de la composition floristique. La valeur de la variable étudiée (salinité, température...) est estimée comme étant la moyenne des valeurs qu'elle prend chez ces K plus proches analogues actuels.

Cette méthode repose fortement sur l'existence de bons analogues actuels, ce qui peut être vérifié par une analyse factorielle préalable ; moyennant quoi elle permet de prendre en compte des espèces de faible amplitude écologique.

### Première application : paléosalinités

#### CHOIX DES DONNÉES ET MÉTHODES

Les résultats que l'on peut obtenir sont étroitement dépendant du choix des milieux actuels. Par conséquent, il est assez évident que les salars actuels du Sud de l'Altiplano fournissent un matériel favorable par leur nombre, la variété de leur salinité (entre 0,4 et 270 g/l) et de leur faciès hydrochimique, dans un cadre géographique peu étendu qui permet de négliger le rôle de facteurs difficilement contrôlables comme celui des roches encaissantes ou certains facteurs climatiques sur les associations de diatomées. La flore actuelle a été étudiée dans 13 lacs, 48 échantillons ont été analysés, prélevés sur trois années non consécutives, mais 26 seulement ont été retenus en raison de la similitude de la flore d'une année sur l'autre.

L'AFC effectuée sur les échantillons actuels met en évidence cinq groupements floristiques expliqués par la composition chimique des eaux.

Groupe I : *Navicula* nov sp. caractérise les lacs essentiellement chlorurés sodiques (Pastos Grandes et Laguna Colorada).

Groupe II : *Navicula* caractérise les lacs essentiellements sulfatés sodiques (Chulluncani, Canapa).

Groupe IIIa : *Amphora* caractérise les lacs chloro-sulfatés sodiques, pauvres en calcium (Hedionda, Pujio, Puripica, Honda, Chiar Kkota).

Groupe IIIb : *Nitzschia* caractérise les lacs chloro-sulfatés sodiques riches en calcium (Ballivian, Ramaditas, Laguna verde).

Groupe IV : *Stauroneis* sp. caractérise les lacs carbonatés sodiques.

L'analyse de la flore fossile a été effectuée sur une coupe de 20 m d'épaisseur qui affleure sur le bord du salar Ballivian. Cette coupe matérialise la sédimentation du lac au cours de l'extension Minchin qui a débuté à une date indéterminée jusque vers 20 000 ans B.P. et au cours de l'extension Tauca située entre 12 000 et 10 000 ans B.P. (SERVANT et FONTES, 1978).

La régression linéaire multiple permet de quantifier les variations de la teneur globale en sels dissous (STD), mais aussi les teneurs des cations et des anions tels que le chlore, les sulfates et le calcium. L'évolution au cours du temps de ces éléments est représentée dans la figure 1, ces différents éléments étant reportés sous forme de pourcentages pour faciliter les comparaisons entre les différents niveaux fossiles.

#### RÉSULTATS (fig. 1)

##### *Le lacustre « Minchin »*

Épisode A, échantillons 24 à 43 : les eaux étaient chloro-sulfatés sodiques, pauvres en calcium et correspondent aux lacs actuels du groupe IIIa. La salinité varie entre 28 et 66 g/l.

Épisode B, échantillon 44 : les eaux sont sulfatées et

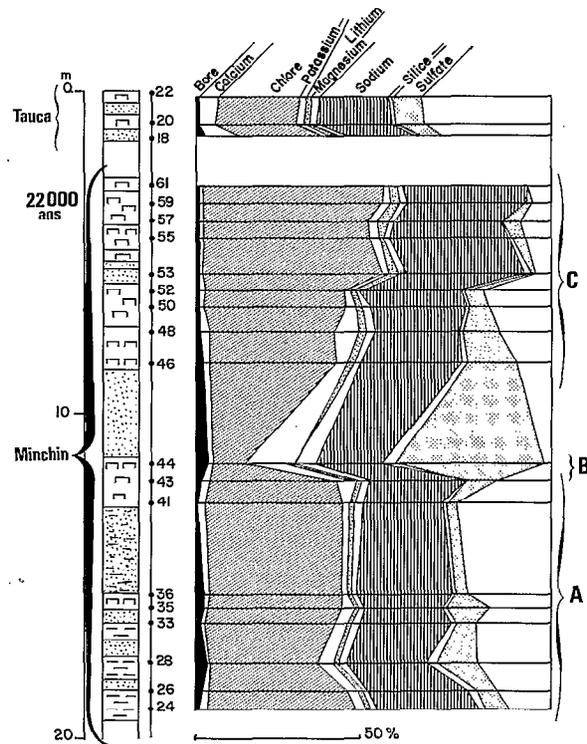


Fig. 1. — Laguna Ballivian. Teneurs des différents ions exprimées en pourcentage.

riches en potassium. Ce changement brutal du chimisme des saumures ne peut pas s'expliquer par une modification du bassin versant, ni par des recyclages de niveaux plus anciens qui étaient relativement pauvres en sulfates. Il semble donc logique de faire appel à un apport extérieur d'eaux plus sulfatées au moment d'une remontée du niveau lacustre qui dépasse l'altitude du seuil qui sépare Ballivian des autres lacs, et notamment du lac Ramaditas. La composition chimique des eaux correspond à celle des lacs du groupe II. La salinité est de 11 g/l.

Épisode C, échantillons 46 à 61 : après un épisode de baisse du niveau lacustre, entre les échantillons 44 et 46, on assiste à un retour des conditions proches de la situation A au début de l'épisode C, le sulfate est dans les saumures à la suite de cet apport extérieur en B, mais il ne sera pas renouvelé à partir du moment où le lac est à nouveau isolé, donc il va évoluer progressivement vers le chimisme qui lui est propre

(échantillons 46 à 52, la salinité est de 35 à 63 g/l), pour arriver à une situation caractérisée par une prépondérance des chlorures (échantillons 53 à 61) qui reflète soit un déficit des sulfates dans le bilan global, soit une augmentation de l'évaporation, soit un temps de séjour plus long des eaux. La salinité augmente, elle est de 67 à 130 g/l. La composition chimique des eaux est celle du groupe I.

### Le lacstre « Tauca »

Il s'agit des échantillons 18 à 22. Après un hiatus dans la sédimentation, correspondant à la longue période de déficit hydrologique qui s'est mise en place entre les épisodes lacustres « Minchin » et « Tauca », le lac se remet en eau vers 12 000 ans et le faciès hydrochimique qui apparaît est celui qui s'observe actuellement dans le salar Ballivian. Identique tant au point de vue de la flore que du point de vue hydrochimique à celui du lac le plus proche, Ramaditas, ces deux lacs communiquent par l'intermédiaire de la nappe phréatique, ce qui explique la légère augmentation des sulfates par rapport à l'épisode précédent. Ces lacs sont chloro-sulfatés sodiques riches en calcium, et correspondent au groupe IIIb. La salinité est de 33 à 62 g/l, légèrement plus faible que la salinité actuelle du lac Ballivian qui est de 79 g/l.

### Deuxième application : paléotempératures

#### PRÉSENTATION DES DONNÉES ET MÉTHODES

Les milieux actuels les plus favorables à l'évaluation de ce paramètre se trouvent situés dans les lacs et les prairies humides de haute altitude où la salinité des eaux extrêmement faible, ne joue pas un rôle prépondérant sur la flore de diatomées. Ces milieux s'étendent entre 4 900 et 4 200 m d'altitude sur une distance de 20 km dans la vallée glaciaire d'Hichu Kkota. La flore fossile a été étudiée dans un affleurement (coupe de Wila Llojeta) situé derrière un verrou glaciaire correspondant au petit âge de la glace. Ces sédiments organiques matérialisent la sédimentation d'une « tourbière » (OSTRIA, *Géodynamique*, 2 (2) 87) : 109-111 qui s'est mise en place entre 4 200 et 500 ans B.P.

La comparaison entre la flore actuelle et la flore fossile a été effectuée avec les méthodes décrites dans la première partie. Grâce à un nombre plus important d'échantillons actuels, la méthode de régression par les plus proches analogues a pu être utilisée et les résultats comparés avec la méthode de régression linéaire multiple.

Connaissant l'altitude, le pH et la température des trois plus proches analogues actuels pour chaque niveau fossile, on établit des courbes de variation quantitative de ces trois paramètres au cours du temps. On constate qu'ils évoluent de manière parallèle et que leurs variations sont comparables aux courbes de variations qualitatives obtenues en faisant

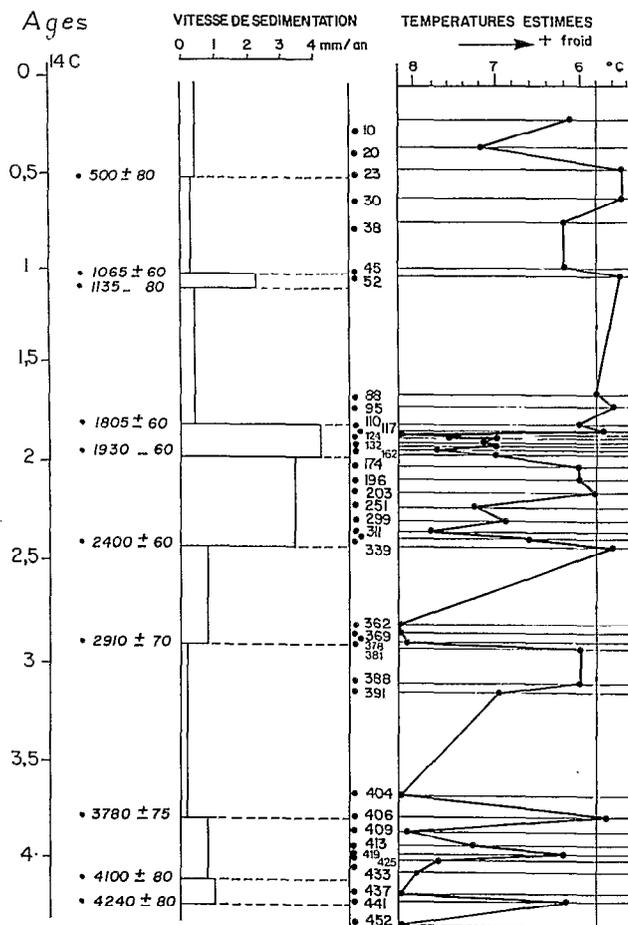


Fig. 2. — Coupe Wila Llojeta 4 800 m à Hichu Kkota. Évaluation des paléotempératures

intervenir les pourcentages des espèces respectivement liées soit au pH, soit à la température selon les données de la littérature.

Ces trois paramètres étant liés, si l'on détermine l'un, on peut déduire les autres. C'est ainsi que l'on peut démontrer que la régression linéaire multiple effectuée sur le seul paramètre altitude donne une courbe tout à fait similaire. Les pics sont cependant émoussés. Mais ce résultat est expliqué par un lissage, lié au fait que les échantillons actuels ont été regroupés dans des classes d'altitude, contrairement à la régression linéaire par les plus proches analogues dans laquelle l'altitude de chaque échantillon actuel a été utilisée telle quelle.

Pour calculer la température à partir de ces courbes de variations d'altitude, on peut utiliser les températures mesurées sur les échantillons actuels analogues ou utiliser pour ces plus proches analogues une température moyenne déterminée à partir d'un gradient altitudinal calculé dans cette même vallée à partir de la température du sol à 50 cm de profondeur ; ce gradient est de 0,53 °C/100 m.

#### RÉSULTATS (fig. 2)

Dans la figure 2, sont représentées les variations de température entre 4 240 et un peu moins de 500 ans B.P., calculées avec la température des trois plus proches analogues selon le gradient de 0°53 pour 100 m. La différence de température entre le bas et le haut de la coupe est d'environ 2 °C. Le refroidissement à partir des températures les plus hautes (environ 8 °C) à 4 240 ans B.P., vers les plus basses températures proches des températures actuelles (entre 6°2 et 5°8) vers 1 800 ans B.P., s'effectue globalement de manière progressive, en passant par des pics extrêmement prononcés de l'ordre de 2 °C.

#### Conclusion

Les valeurs obtenues, soit en ce qui concerne les paléosalinités, soit en ce qui concerne les paléotempératures sont très semblables entre elles quelle que soit la méthode employée ; c'est pourquoi, malgré les effectifs modérés des échantillons, les résultats que nous avons avancés nous paraissent assez sûrs.

#### BIBLIOGRAPHIE

- ROUX (M.), 1985. — Algorithmes de classification. Méthodes + Programmes. Masson, Paris, 151 p.
- SERVANT (M.), FONTES (J.C.), 1978. — Les lacs quaternaires des Hauts Plateaux des Andes boliviennes. Premières interprétations paléoclimatiques. *Cah. ORSTOM, sér. Géologie*, X, 1 : 9-23.

- SERVANT-VILDARY (S.), 1986. — Les diatomées actuelles des Andes de Bolivie. (Taxonomie, Écologie). *Cahiers de Micro-paléontologie*, 1, 3-4 : 99-124, 14 pl.