

# RECONSTRUCTION PALEOENVIRONNEMENTALE DES DERNIERS 30.000 ANS DE LA SEQUENCE DE LA DRAGA (BANYOLES, ESPAGNE), DEDUITE DES RAPPORTS (Sr/Ca) ET (Mg/Ca) DES VALVES D'OSTRACODES LACUSTRES

Guy WANSARD<sup>1</sup>

(7 Figures, 2 Tableaux)

1. Unité de Paléontologie et de Paléogéographie, Université catholique de Louvain, Place L. Pasteur 3 - B-1348 Louvain-la-Neuve.

**RESUME.** Des études géochimiques récentes ont montré que les rapports (Sr/Ca) et (Mg/Ca) des valves d'ostracodes permettent de reconstruire les paléosalinités et paléotempératures des lacs. Cette technique a été appliquée à la séquence lacustre de La Draga (Banyoles, Espagne) qui enregistre une sédimentation calcaire entre ~30 et ~6 ka BP. Les teneurs en strontium et en magnésium ont été déterminées sur chacune de 957 valves fossiles de l'espèce *Cyprideis torosa*. Les résultats montrent que les rapports (Sr/Ca) et (Mg/Ca) de *C. torosa* varient de manière indépendante. L'évolution de la température moyenne de l'eau en été, reconstruite à partir des rapports (Mg/Ca)<sub>*C. torosa*</sub>, a été comparée aux données polliniques de la séquence. Il semble qu'entre 30 et 14,4 ka BP, les fluctuations de température étaient trop rapides pour permettre à la végétation de réagir. Au cours du Tardiglaciaire, une bonne covariation s'observe entre pollen et température bien que certaines fluctuations rapides de la température restent sans équivalent dans le pollen. Cette comparaison illustre un des principaux avantages de l'utilisation de la géochimie des ostracodes: l'enregistrement de fluctuations brèves et rapides des changements climatiques et de l'environnement.

**MOTS-CLES:** Quaternaire, Paléoclimatologie, Espagne, Ostracode, *Cyprideis torosa*, Géochimie, Eléments en traces

**ABSTRACT.** Paleoenvironmental reconstruction of the latest 30,000 years in the Draga sequence (Banyoles, Spain) based on Sr/Ca and Mg/Ca ratios in freshwater ostracodes. Recent work demonstrated the importance of Sr/Ca and Mg/Ca ratios of ostracod shells for reconstructing paleosalinity and paleotemperature of lakes. This technique was applied to a 30,000 - 6,325 years old lacustrine sequence in NE Spain (La Draga, Banyoles). Fossil *Cyprideis torosa* valves have been individually analysed for their magnesium and strontium content with respect to calcium. Results show that fluctuations in (Sr/Ca)<sub>*C. torosa*</sub> are not linked to (Mg/Ca)<sub>*C. torosa*</sub> fluctuations. Past summer temperature changes, reconstructed from (Mg/Ca)<sub>*C. torosa*</sub>, are compared to the pollen data of the La Draga sequence. Between 30 and 14.4 ka BP, rapid fluctuations in temperature are not recorded by the vegetation. During the Late Glacial, a good covariation occurs between temperature and pollen data, although some temperature fluctuations are not recorded by the pollen. This comparison highlights the very short-time response of ostracod valve geochemistry to environmental and climate changes.

**KEYWORDS:** Quaternary, Paleoclimatology, Spain, Ostracod, *Cyprideis torosa*, Geochemistry, Trace-elements

## 1. INTRODUCTION

Les ostracodes sont des micro-crustacés caractérisés par une carapace bivalve de calcite faiblement magnésienne. Ils colonisent pratiquement tous les milieux aquatiques et leurs coquilles se retrouvent dans les sédiments, parfois en très grande abondance. Basée sur une détermination spécifique des valves, les assemblages d'ostracodes livrent une reconstitution des

conditions paléoenvironnementales, en terme de profondeur du milieu, de salinité,... (ex. Peypouquet *et al.*, 1979; Forester, 1983; Cohen & Nielsen, 1986; Neale, 1988). Ces reconstitutions restent le plus souvent qualitatives, au mieux semi-quantitatives.

Un intérêt croissant pour l'étude géochimique des valves d'ostracodes du Quaternaire s'est marqué au cours des deux dernières décennies. Il répond à la

possibilité de quantifier les conditions physiques et chimiques du milieu de calcification des valves, à partir de leurs teneurs en éléments en traces (Sr, Mg). Les ostracodes possèdent des caractéristiques propres qui permettent de relier de manière ponctuelle et précise le contenu géochimique de leurs valves aux conditions du milieu. Les ostracodes accroissent leur taille en effectuant 8 à 9 mues successives avant d'atteindre le stade adulte. Après chaque mue, l'ostracode édifie de nouvelles valves adaptées à la taille du corps. La calcification est un processus extrêmement rapide, se déroulant en quelques jours (Chivas *et al.*, 1983; Roca & Wansard, soumis), voire en quelques heures (Turpen & Angell, 1971). Le calcium et les éléments en traces, Sr et Mg, incorporés dans la coquille sont directement extraits du milieu aqueux, immédiatement après la mue (Turpen & Angell, 1971; Chivas *et al.*, 1983). En conséquence, les teneurs en éléments en traces sont des indicateurs fiables des conditions environnementales restreintes au moment précis de la calcification. En outre, ces indicateurs répondent quasi instantanément aux modifications de l'environnement.

La teneur des éléments en traces, Sr et Mg, a été déterminée sur des valves de l'espèce *Cyprideis torosa* extraites de la séquence lacustre de La Draga (Banyoles, NE Espagne) remontant à 30.000 ans. L'évolution des rapports (Sr/Ca) obtenus sur les valves de cette séquence est décrite et discutée. La reconstitution des paléotempératures, à partir du rapport (Mg/Ca) de *C. torosa*, a été publiée précédemment par Wansard (1996 a, b). Dans cet article, une comparaison entre ces paléotempératures et les données polliniques obtenus sur les mêmes échantillons de La Draga est discutée.

## 2. PRINCIPES DE L'ETUDE GEOCHIMIQUE DES ELEMENTS EN TRACES DANS LES VALVES D'OSTRACODES

Les relations entre l'incorporation des éléments en traces dans les valves d'ostracodes et les caractéristiques du milieu qui contrôlent cette incorporation s'expriment par un coefficient de partition D(M):

$$D(M)_T = (M/Ca)_{\text{valve}} / (M/Ca)_{\text{eau}}$$

où M représente Sr ou Mg, M/Ca est un rapport molaire, et T est la température de l'eau.

Chivas *et al.* (1983) ont montré que le rapport (Sr/Ca) des valves d'ostracodes est proportionnel au rapport (Sr/Ca) de l'eau, de sorte que le coefficient de partition D(Sr) constitue une constante pour un genre donné. La teneur en Sr des valves fossiles s'est révélée un indicateur fiable des changements de paléosalinité

pour les milieux lacustres des régions arides ou semi-arides (Gasse *et al.*, 1987; Gibert *et al.*, 1990; Chivas *et al.*, 1985, 1993).

Le coefficient de partition D(Mg) pour un genre donné est fonction de la température de l'eau (Chivas *et al.*, 1983; Engstrom & Nelson, 1991; Corrège, 1993). Le rapport (Mg/Ca) enregistré dans les valves dépend donc à la fois de la température et du rapport (Mg/Ca) de l'eau. Cette double influence implique que le rapport (Mg/Ca) des valves fossiles constitue un paléothermomètre lorsque le milieu de calcification se caractérise par un rapport (Mg/Ca) de l'eau constant (Dwyer *et al.*, 1995; Wansard, 1996 a,b). La quantification des paléotempératures s'obtient par l'établissement d'une équation de calibration de la température à partir des rapports (Mg/Ca) de valves actuelles. Il faut encore noter que seules les valves d'adultes bien calcifiées doivent être choisies. Les valves juvéniles, ou d'adultes faiblement calcifiées, incorporent une quantité variable de Mg, pour une température donnée (Chivas *et al.*, 1983, 1986a; Roca & Wansard, soumis).

## 3. LE LAC DE BANYOLES (N.E. ESPAGNE)

Le lac de Banyoles (42°7' N, 2°45' E) se situe en Catalogne espagnole, à quelque 25 km de la Méditerranée et à quelque 40 km au sud des Pyrénées (Fig. 1). L'altitude du plan d'eau est de 173 m a.s.l.

Le lac de Banyoles constitue le témoin actuel d'un vaste système lacustre développé au cours du Plio-Pléistocène (Julià, 1980). D'origine karstique, le lac est alimenté essentiellement par des apports sous-lacustres d'eau sous pression, issue d'un aquifère calcaro-dolomitique et gypseux qui s'étale sur plusieurs dizaines de km<sup>2</sup> (Canals *et al.*, 1990).

La composition chimique de l'eau du lac résulte de la dissolution des roches carbonatées éocènes sous-jacentes et d'un processus concomitant de dédolomitisation (Bischoff *et al.*, 1994). En conséquence les eaux sont sulfato-carbonatées, et les principaux cations sont Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup>. Le processus de dédolomitisation et un taux annuel de renouvellement de l'eau (Planas, 1973) empêchent à long terme une concentration des principaux ions de l'eau.

L'évolution annuelle de la température de l'eau, en fonction de la profondeur, témoigne du caractère

RECONSTRUCTION PALEOENVIRONNEMENTALE DES DERNIERS 30 000 ANS

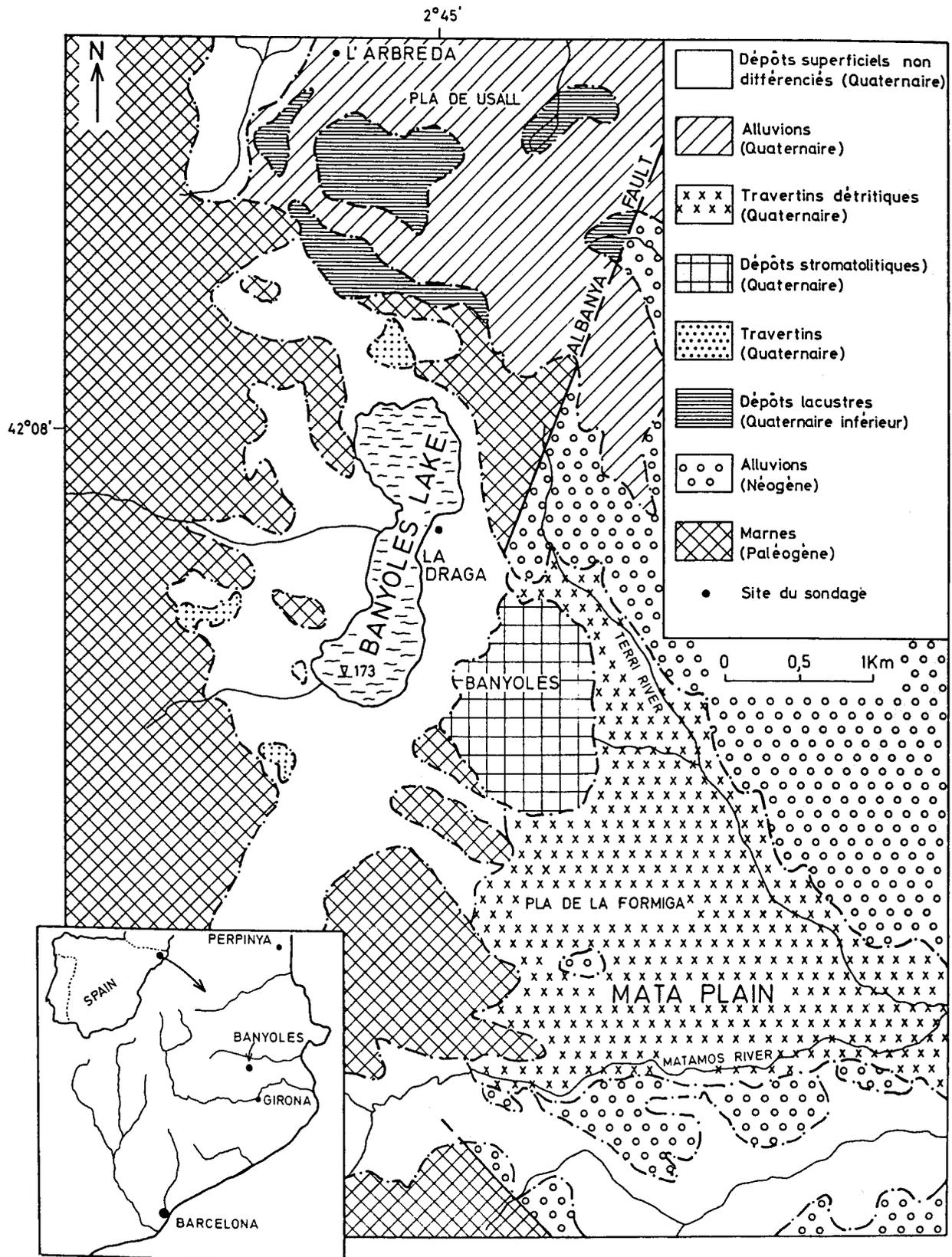


Figure 1. Carte géologique de la région de Banyoles et localisation du site de sondage de la séquence de La Draga (modifié de Pérez-Obiol & Julià, 1994).

monomictique du lac de Banyoles. Une stratification thermique s'établit de mai à octobre tandis qu'entre novembre et avril un brassage vertical de l'eau élimine le gradient de température dans l'ensemble de la tranche d'eau (Planas, 1973; Julià, 1980).

#### 4. LA SEQUENCE DE LA DRAGA (BANYOLES)

Trois sondages réalisés à quelques mètres du bord est du lac de Banyoles, au lieu-dit La Draga (Fig. 1), ont livré une séquence complète de 33,1 mètres de long.

##### 4.1. DESCRIPTION LITHOLOGIQUE

Deux lithologies se différencient nettement:

- entre 33,1 m et 1,3 m de profondeur, le sédiment est carbonaté, composé essentiellement de débris calcifiés de tiges et d'oogones de characées, d'ostracodes et de gastéropodes. Des lamellibranches s'observent plus occasionnellement. Ce sédiment est affecté de variations granulométriques qui se distinguent en passées de sable calcaire plus ou moins grossier, parfois accompagnées de concrétions carbonatées de tailles supérieures au millimètre. Un litage synsédimentaire s'observe macroscopiquement;

- entre 1,30 et 0,7 m de profondeur, une couche de tourbe, dépourvue d'ostracodes, scelle la sédimentation calcaire de La Draga.

La présence continue des tiges de characées, au sein des dépôts carbonatés, indique qu'au site du sondage la tranche d'eau est en permanence restée inférieure à ~11,5 m (Wansard, 1995). La préservation des structures calcifiées des thalles de characées et l'absence de tri granulométrique dans les valves d'ostracodes indiquent un milieu de faible énergie (Dean, 1981; Whatley, 1983).

##### 4.2. DATATIONS

Deux datations  $^{14}\text{C}$  ont livré les âges de  $5630 \pm 90$  a BP (Lv-1921) et de  $5020 \pm 60$  a BP (Lv-1920), respectivement pour la base (124-117 cm) et le sommet (84-77 cm) de la tourbe. Selon l'équation de Bard *et al.* (1993), ces âges correspondent respectivement à 6325 et 5623 années calendriers BP.

Neuf datations obtenues par dosage U/Th sur carbonates (Pérez-Obiol & Julià, 1994) indiquent que la sédimentation calcaire de la séquence s'est opérée entre ~30 et 6,3 ka BP (Fig. 2), à raison d'un taux de sédimentation moyen de 1,3 mm/an.

En référence à la chronologie océanique (Martinson

*et al.*, 1987), la séquence de La Draga s'étale de la fin du stade isotopique 3 (~30 ka BP) à la première moitié de l'Holocène (~6 ka BP).

#### 4.3. EVOLUTION DU PAYSAGE VEGETAL DE LA DRAGA

Les résultats de l'étude palynologique des échantillons de La Draga, publiés par Pérez-Obiol & Julià (1994), sont résumés ci-dessous.

Huit zones polliniques sont définies en fonction des variations des taxa écologiquement les plus significatifs (Fig. 2):

- les zones B1 et B3, épisodes froids entre 33,1 et 20 m de profondeur, encadrent un interstade représenté par la zone B2. L'assemblage pollinique des zones B1 et B3 est le reflet d'une végétation ouverte;

- la zone B2 (31-28 m) montre une augmentation sensible de *Pinus*, *Quercus* et *Betula*, en même temps que diminuent *Artemisia* et les Chénopodiacées, suggérant des conditions climatiques moins rigoureuses. La concentration pollinique n'augmente toutefois pas, ce qui s'expliquerait par un faible développement forestier, bien plus que par un interstade paléoclimatique vrai;

- la zone B4 (entre 20 et 9,2 m) se caractérise par la dominance des pollens d'*Artemisia* et des Poacées et par de faibles valeurs des pollens d'arbres (AP). Le nombre très faible d'espèces herbacées serait lié à l'installation d'une végétation de type steppique, sous conditions froides et arides. Ces conditions apparaissent plus drastiques pour la sous-zone B4b (entre 11,3 et 9,2 m) du fait de ses pourcentages plus élevés de Chénopodiacées et surtout des valeurs très basses en AP;

- la zone B5 (entre 9,2 et 6,9 m) se caractérise par une augmentation de *Pinus* et de *Betula*, suivie par celles de *Acer* et de *Juniperus*. L'apparition dans le paysage de ces arbres pionniers traduit le début de l'amélioration climatique correspondant aux interstades Bølling/Allerød du Tardiglaciaire (14.4-12 ka BP);

- la zone B6 (entre 6,9 et 6,3 m) marque une nouvelle expansion de la végétation steppique, soulignée par une augmentation significative d'*Artemisia*, d'*Ephedra* et des Poacées et par la diminution des pollens d'arbres. La zone B6 correspond à l'événement climatique du Dryas récent;

- la zone B7 (entre 6,3 et 5,5 m) se distingue par une augmentation importante des pollens d'arbres, *Juniperus*, *Betula* et *Acer*, et par la chute des pourcentages de *Pinus*. Une nette amélioration climatique est entamée;

- la zone B8 (< 5,5 m) termine l'histoire végétale de la séquence, avec les plus hauts pourcentages de pollens d'arbres et la présence dominante des espèces forestières

RECONSTRUCTION PALEOENVIRONNEMENTALE DES DERNIERS 30 000 ANS

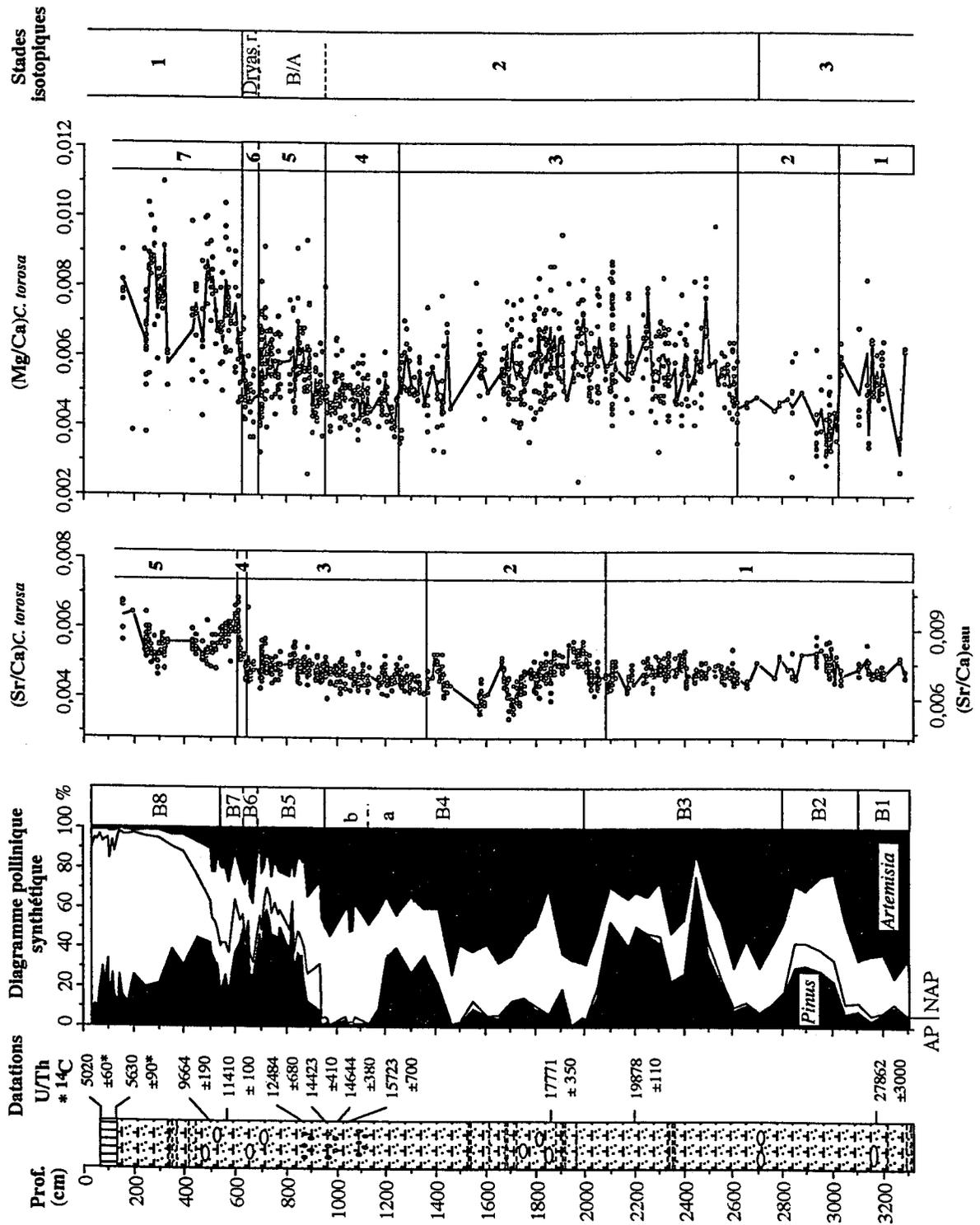


Figure 2. Synthèse des données de la séquence de La Draga.

	Age (ka BP)	(Sr/Ca) <sub>moyen</sub>	$\sigma$	n rapports
La Draga	6,6 - ~ 30	0,00484	0,00049	957
Holocène	6,6 - 11,6	0,00558	0,00044	146
Stades 3 et 2	11,6 - ~30	0,00470	0,00036	811
Dryas récent	11,6 - 11,9	0,00474	0,00040	28
Bølling / Allerød	11,9 - 14,4	0,00490	0,00026	131
Stades 3 et 2 (partie inférieure)	14,4 - ~30	0,00466	0,00036	652
Lac Banyoles	Actuel	0,00640	0,00033	51

Tableau 1. Moyenne des rapports Sr/Ca de *C. torosa* pour le lac de Banyoles et diverses périodes de la séquence de La Draga.

mésophiles telles que *Quercus* et *Corylus*.

Les zones B7 et B8 traduisent le développement de la végétation forestière caractéristique de l'Holocène.

## 5. GEOCHIMIE DES VALVES D'OSTRACODES DE LA DRAGA

### 5.1. RAPPORTS (Sr/Ca) DES VALVES DE *CYPRIDEIS TOROSA* (Fig. 2)

Le rapport (Sr/Ca) a été déterminé pour chacune des 957 valves de *Cyprideis torosa* adulte, extraites de 214 échantillons répartis le long des 33,1 m de la séquence de La Draga. Les résultats (repris intégralement dans Wansard (1995) et consultables à la bibliothèque des Sciences de l'UCL) sont illustrés à la figure 2 qui reprend aussi l'évolution de la moyenne des rapports (Sr/Ca) de chaque niveau. Cinq zones sont distinguées:

(1) entre 33,1 m à 20,9 m de profondeur: le rapport (Sr/Ca)<sub>moyen</sub> oscille entre un minimum de 0,00418 et un maximum de 0,00545. La variation la plus importante s'enregistre entre 30,05 et 29,95 m, le rapport (Sr/Ca)<sub>moyen</sub> passant de 0,00444 à 0,00545, soit une augmentation de 23 %;

(2) entre 20,9 et 13,55 m: les variations de (Sr/Ca)<sub>moyen</sub> sont plus élevées. Trois augmentations majeures se marquent:

- entre 20,9 m et 19,35 m, (Sr/Ca)<sub>moyen</sub> augmente de 32 % (0,00418 - 0,00553) en ~1000 ans (19,2 - 18,2 ka BP);

- entre 17,15 et 16,65 m, (Sr/Ca)<sub>moyen</sub> passe de 0,00384 à 0,00503, soit à nouveau une augmentation de 32 % en ~100 ans (17,4 - 17,3 ka BP);

- entre 15,6 et 13,95 m, (Sr/Ca)<sub>moyen</sub> augmente de 0,00374 à 0,00522, soit de 40 % en ~400 ans (17 - 16,6 ka BP).

Trois diminutions surviennent après ces augmentations:

- 31 % de décroissance en ~800 ans (18,2 et 17,4 ka BP), (Sr/Ca)<sub>moyen</sub> atteignant ici le minimum pour l'ensemble de la séquence, soit 0,00374;

- 25 % en ~300 ans (17,3 - 17 ka BP);

- 22 % en ~100 ans (16,6 à 16,5 ka BP), entre 13,95 m (0,00522) et 13,55 m (0,00410);

(3) entre 13,55 et 6,4 m: (Sr/Ca)<sub>moyen</sub> est affecté par de plus faibles fluctuations dont la plus importante, entre 13,55 et 12,45 m, correspond à 15 % d'augmentation (0,00427-0,00489). Au cours de cette période, le minimum est atteint à 13,55 m (0,00410), et le maximum à 8,35 m (0,00530);

(4) entre 6,4 et 6,1 m: le rapport (Sr/Ca)<sub>moyen</sub> passe de 0,00457 à 0,00638, enregistrant l'augmentation la plus rapide, et une des deux plus importantes, de la séquence, soit 40 % en ~100 ans (11,65-11,55 ka BP). Cette forte augmentation correspond au passage du Tardiglaciaire à l'Holocène;

(5) au dessus de 6,1 m: le rapport (Sr/Ca)<sub>moyen</sub> diminue progressivement jusqu'à 4,8 m (0,00515) puis, entre 4,8 et 2,9 m, il fluctue entre 0,00515 et 0,00498, avec deux maxima marqués à 4,3 et 3,3 m, respectivement de 0,00557 et de 0,00556. De 3,3 à 1,55 m, (Sr/Ca) passe de 0,00556 à 0,00633, après avoir enregistré à 1,95 m le maximum de la séquence, 0,00642.

Le rapport (Sr/Ca)<sub>moyen</sub> de chaque niveau analysé reste inférieur ou égal au rapport (Sr/Ca)<sub>moyen</sub> des *Cyprideis* du lac actuel, 0,0064. La moyenne calculée pour l'ensemble des rapports (Sr/Ca) de la séquence est de 0,00484 ± 0,00049 (Tab. 1). La moyenne des 146 rapports (Sr/Ca) de l'Holocène est de 0,00558 ± 0,00044, soit 20% supérieure à la moyenne de l'ensemble des stades 3 et 2, 0,00470 (Tab. 1). Le Tardiglaciaire (Bølling/Allerød et Dryas récent) se caractérise par un rapport (Sr/Ca)<sub>moyen</sub> de 0,00487, valeur proche de celle du reste du glaciaire de La Draga

(0,00466). Au sein du Tardiglaciaire, l'amélioration climatique du Bølling/Allerød ne donne pas de rapports (Sr/Ca) très différents de ceux du coup de froid du Dryas récent.

## 5.2. LES RAPPORTS (Mg/Ca) DE *C. TOROSA* (Fig. 2)

Le rapport (Mg/Ca) a été déterminé sur chacune des mêmes 948 valves adultes de *Cyprideis torosa* de La Draga qui ont livré les rapports (Sr/Ca) discutés ci-avant. Neuf analyses sur 957, du contenu en Mg de *C. torosa*, n'ont pu être réalisées suite à de mauvaises manipulations des solutions. En conséquence, 213 sur 214 niveaux livrent un rapport (Mg/Ca)<sub>moyen</sub>.

La moyenne des rapports (Mg/Ca) calculée pour chacun des 213 niveaux, varie entre un minimum de 0,00323 et un maximum de 0,00911, valeurs enregistrées respectivement à 32,7 m et à 3,2 m de profondeur. Les rapports individuels varient entre un minimum de 0,00257 (à 28,4 m) et un maximum de 0,01102 (à 3,2 m).

La courbe qui passe par la moyenne des rapports (Mg/Ca) de chaque niveau montre un grand nombre de fluctuations. Son évolution permet de diviser la séquence en sept zones:

(1) 32,90 - 30,25 m: après une valeur de 0,00623 à 32,90 m, le rapport (Mg/Ca)<sub>moyen</sub> passe de 0,00323 à 0,00595 entre 32,70 m et 30,35 m;

(2) 30,25 - 26,10 m: après un minimum de 0,0039, enregistré à 30,15 m de profondeur, le rapport (Mg/Ca)<sub>moyen</sub> augmente légèrement mais reste faible jusqu'à 26,15 m de profondeur;

(3) 26,10 - 12,40 m: (Mg/Ca)<sub>moyen</sub> augmente progressivement jusqu'à 25,55 m (0,00569), puis drastiquement jusqu'à 25,25 m (0,00785). Entre 25 et ~17 m, le rapport (Mg/Ca)<sub>moyen</sub> oscille entre un minimum de 0,00481 et un maximum de 0,00793. De ~17 à 12,45 m, il décroît, affecté de fluctuations plus faibles;

(4) 12,40 - 9,70 m: (Mg/Ca)<sub>moyen</sub> a diminué et se maintient à des valeurs faibles mais assez constantes, oscillant entre 0,00385 et 0,00533;

(5) 9,70 - 6,90 m: jusqu'à 7,15 m, la courbe du rapport (Mg/Ca)<sub>moyen</sub> marque une augmentation générale, entrecoupée de fluctuations dont la plus importante survient entre 8,45 et 8,35 m, (Mg/Ca)<sub>moyen</sub> passant de 0,00699 à 0,00480;

(6) 6,90 - 6,30 m: (Mg/Ca)<sub>moyen</sub> diminue progressivement pour atteindre un minimum de 0,00461, à 6,6 m;

(7) 6,30 - 1,55 m: (Mg/Ca)<sub>moyen</sub> augmente à nouveau, jusqu'à atteindre un maximum de 0,0087 à

4,90 m. Passant à 3,30 m par un minimum de 0,00578, il atteint trois maxima: à 3,2 m (0,00911), à 2,70 m (0,00890) et à 1,55 m (0,00812).

Les zones (1) et (2) correspondent à la fin du stade isotopique 3 et à sa transition avec le stade 2. Les zones (3) et (4) reprennent la partie inférieure du stade isotopique 2. Les zones (5) et (6) correspondent respectivement aux interstades Bølling/Allerød et au Dryas récent. La zone (7) caractérise la première moitié du stade isotopique 1, équivalent de l'Holocène.

## 5.3. RELATIONS ENTRE (Sr/Ca) ET (Mg/Ca) DES *CYPRIDEIS TOROSA* DE LA DRAGA

La comparaison, sous forme de diagrammes de dispersion (Fig. 3), entre les rapports (Sr/Ca) et (Mg/Ca) mesurés sur chaque valve de *C. torosa* indique bien l'absence de relation entre ces deux paramètres, pour le Passé comme pour l'Actuel. Au cours des stades isotopiques 3 et 2, les rapports (Sr/Ca)<sub>C. torosa</sub> sont le plus souvent compris entre 0,0040 et 0,0050, et les rapports (Mg/Ca)<sub>C. torosa</sub> entre 0,0040 et 0,0070 (Fig. 4). A l'Holocène, les valeurs de (Sr/Ca)<sub>C. torosa</sub>, généralement comprises entre 0,005 et 0,006, sont plus élevées qu'au cours des stades 3 et 2, et les rapports (Mg/Ca)<sub>C. torosa</sub> sont le plus souvent compris entre 0,005 et 0,010. Il en est de même pour les rapports (Mg/Ca)<sub>C. torosa</sub> de l'Actuel, bien que les rapports (Sr/Ca)<sub>C. torosa</sub>, compris entre 0,0060 et 0,0080, soient encore supérieurs à ceux enregistrés au cours de l'Holocène.

En bref, à La Draga, les variations du rapport (Sr/Ca) des valves de *C. torosa* n'ont pas modifié les rapports (Mg/Ca)<sub>C. torosa</sub>. Les deux rapports sont bien indépendants.

## 6. DISCUSSIONS

### 6.1. VARIATIONS DU RAPPORT (Sr/Ca)<sub>C. TOROSA</sub>

Le coefficient de partition D(Sr) déterminé à partir des valves de *C. torosa* du lac de Banyoles est de  $0,681 \pm 0,035$  (1s) (Wansard, 1995). Il permet de reconstituer l'évolution du rapport (Sr/Ca) de l'eau pour la séquence de La Draga (Fig. 2).

Pour les lacs de régions arides ou semi-arides, Chivas *et al.* (1985) ont montré que les variations du rapport (Sr/Ca) des valves d'ostracodes sont indicatrices des changements de salinité des eaux. Cependant, la corrélation positive entre le rapport (Sr/Ca)<sub>ostracode</sub> et la salinité n'est pas observée systématiquement dans tous les systèmes lacustres (Engstrom & Nelson, 1991;

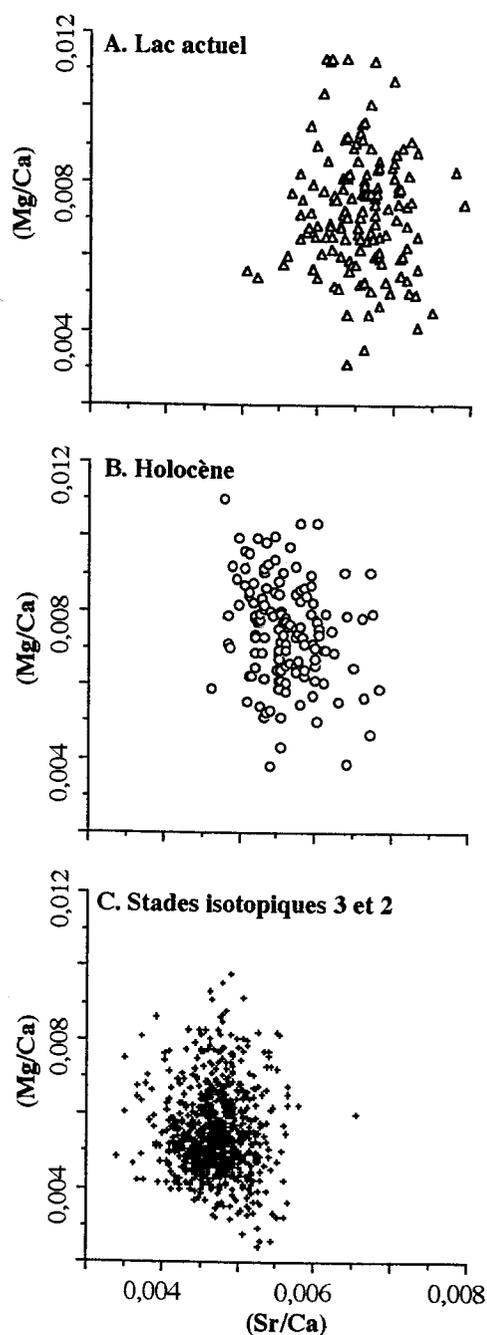


Figure 3. Relation entre les rapports (Sr/Ca) et (Mg/Ca) des valves de *C. torosa*, pour le lac actuel de Banyoles (A), pour l'Holocène (B) et pour les stades isotopiques 3 et 2 (C) de la séquence La Draga.

Holmes, 1996). Cette constatation semble devoir s'appliquer au lac de Banyoles et à la séquence lacustre de La Draga.

Par définition du coefficient de partition  $D(Sr)$ , le rapport (Sr/Ca) des ostracodes ne dépend que du rapport (Sr/Ca) de l'eau. Par contre, le coefficient de partition

$D(Mg)$  étant une fonction de la température, le rapport (Mg/Ca) des ostracodes dépend non seulement de la température mais aussi du rapport (Mg/Ca) de l'eau. Par conséquent, si les rapports (Sr/Ca) et (Mg/Ca) de l'eau varient ensemble, le rapport (Mg/Ca)/(Sr/Ca) (ou encore Mg/Sr) des ostracodes ne doit dépendre que de la température.

A La Draga, la moyenne des rapports (Mg/Sr), calculée pour chaque niveau de la séquence, covarie avec le rapport  $(Mg/Ca)_{moyen}$  (Fig. 5). En outre, pour les stades isotopiques 3 et 2, la moyenne des valeurs de (Mg/Sr) est de 1,19, donc supérieure au rapport  $(Mg/Sr)_{moyen}$  pour *C. torosa* du lac actuel, ~1,09. Si le rapport (Mg/Sr) était un indicateur de la température de l'eau, le stade isotopique 2 à La Draga aurait été plus chaud que l'Actuel. Le rapport  $(Mg/Sr)_{C. torosa}$  ne peut donc être un indicateur de la température, ni à La Draga ni pour le lac actuel de Banyoles, probablement parce que les variations du rapport (Sr/Ca) de l'eau ne correspondent pas à une éventuelle variation du rapport (Mg/Ca) de l'eau. Les facteurs qui modifient le rapport (Sr/Ca) de l'eau à La Draga restent cependant à préciser.

## 6.2. RECONSTITUTION DES PALEOTEMPERATURES

A partir du rapport (Mg/Ca) des valves de *C. torosa* prélevées dans le lac actuel de Banyoles, une équation propre à cette espèce a été établie (Wansard, 1995, 1996a,b):

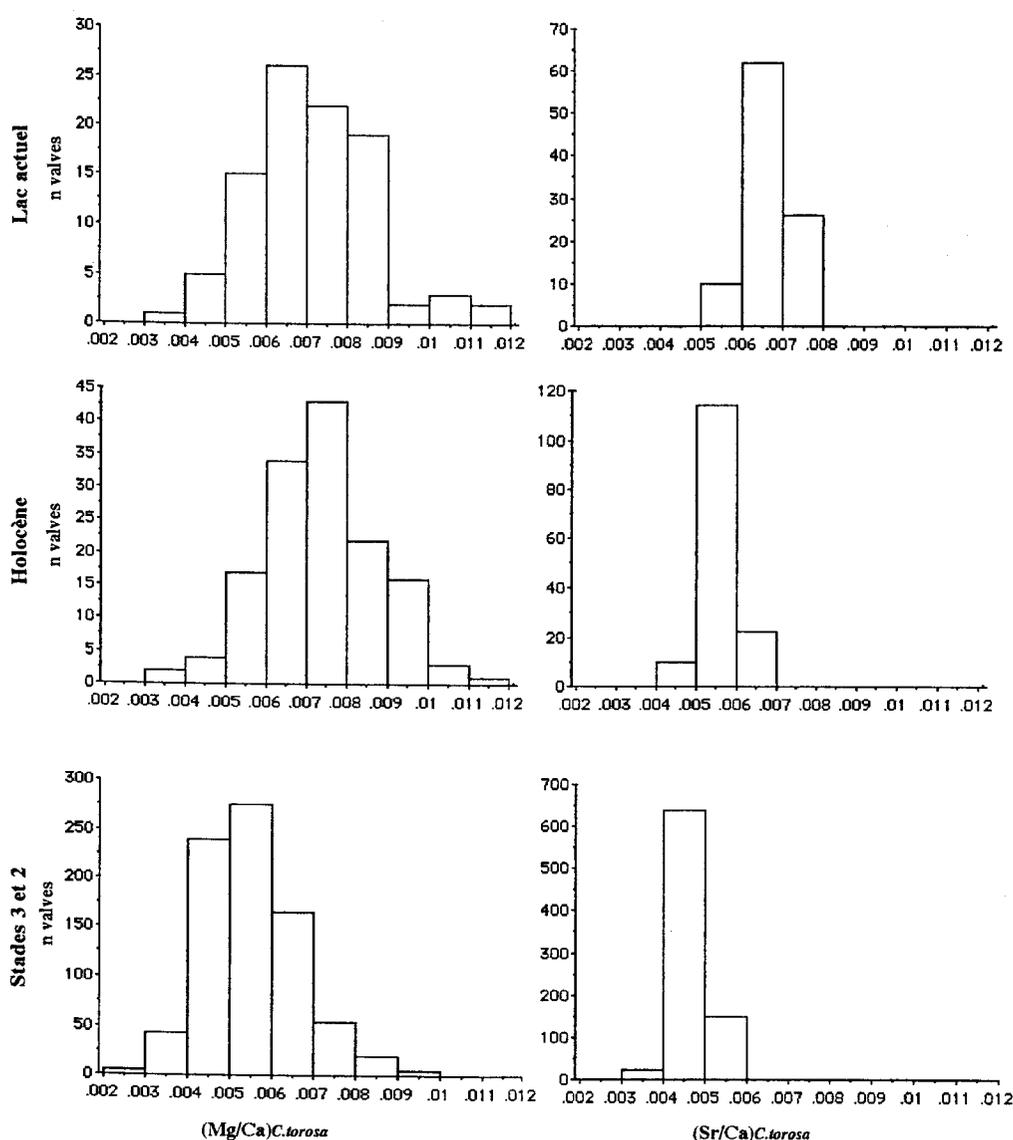
$$T (^{\circ}C) = 3,3 + 1971 (Mg/Ca)_{C.torosa} \quad (1)$$

Cette équation s'applique aux valves fossiles de *C. torosa* pour autant que le rapport (Mg/Ca) de l'eau (0,65) n'ait guère varié au cours de la sédimentation de la séquence. Plusieurs éléments ont été avancés pour confirmer cette constance du rapport (Mg/Ca) de l'eau (Wansard, 1995; 1996a,b, en prép.):

- le mode d'alimentation du lac: 80 % du volume d'eau du lac sont fournis par un flux sous-lacustre d'eau sous pression issue d'un large aquifère karstique. Les 20 % restants proviennent de ruisseaux dont l'alimentation est aussi, pour l'essentiel, d'origine karstique (Planas, 1973; Canals *et al.*, 1990). En outre, l'évaporation est, selon Planas (1973), estimée à moins de 1% du volume total des eaux du lac;

- le processus de dédolomitisation qui génère la karstification dans la région de Banyoles contrôle la composition chimique de l'eau dans le lac (Bischoff *et al.*, 1994). La dédolomitisation ne nécessite pas l'intervention continue d'un acide comme agent dissolvant. Cette réaction a donc pu être efficace même au cours du Glaciaire, bien que les eaux de recharge de

## RECONSTRUCTION PALEOENVIRONNEMENTALE DES DERNIERS 30 000 ANS



**Figure 4.** Histogrammes de fréquence des rapports (Sr/Ca) et (Mg/Ca) des valves de *C. torosa* du lac actuel, de l'Holocène et des stades isotopiques 3 et 3 de la séquence de La Draga.

l'aquifère devait être moins agressive car appauvries en CO<sub>2</sub>.

- la calcite faiblement magnésienne est la seule phase authigénique présente dans les sédiments calcaires de La Draga;

- la monotonie dans la composition des assemblages d'ostracodes de La Draga, dont toutes les espèces principales - *Candona marchica*, *Candona neglecta*, *Cyclocypris ovum*, *Cypria ophthalmica*, *Cyprideis torosa*, *Darwinula stevensoni*, *Ilyocypris gr. bradii-gibba*, *Paralimnocythere messanai*, *Paralimnocythere psammophila* - colonisent encore le lac actuel, témoigne d'une bonne stabilité du système lacustre.

En tenant compte du cycle de vie de *C. torosa*, Wansard (1996b) a montré que la valeur de  $[(Mg/Ca)_{moyen} + 2s]$ , introduite dans l'équation (1) à la place de  $(Mg/Ca)_{C.torosa}$ , correspond à la température moyenne de l'eau en été ( $s$  est l'écart-type des rapports (Mg/Ca) de chaque niveau de la séquence).

Ainsi reconstituées, les températures moyennes d'été montrent de très nombreuses fluctuations tout au long de la séquence de La Draga (Fig. 6). Entre ~30 et ~24 ka BP, la température moyenne de l'eau en été reste inférieure à 18 °C, à l'exception d'un seul niveau. Entre

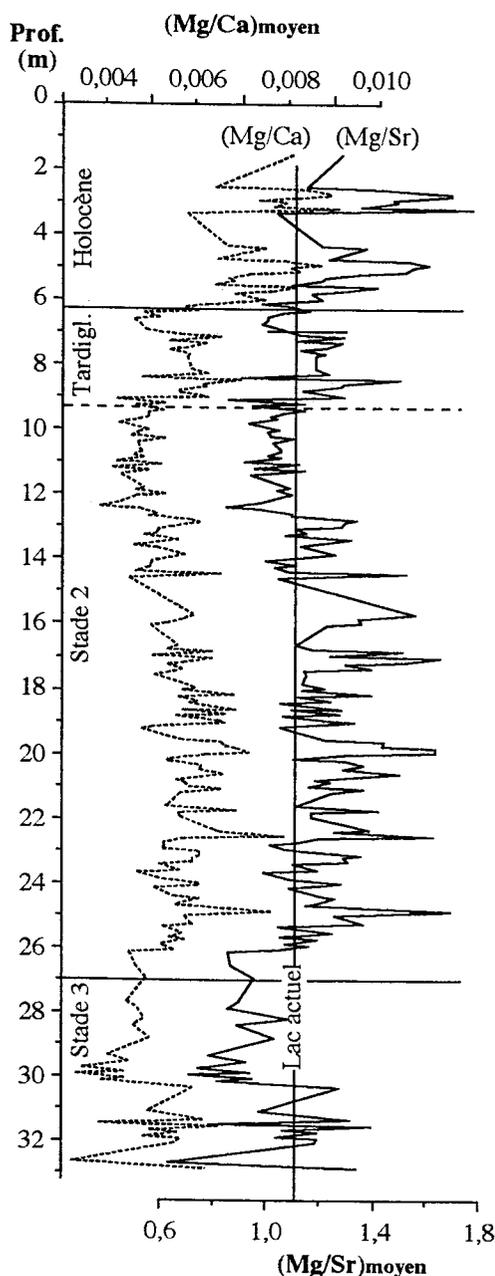


Figure 5. Comparaison entre l'évolution du rapport  $(Mg/Ca)^{moyen}$  des valves de *C. torosa* et celle du rapport  $(Mg/Sr)$  de la même espèce, à La Draga.

~24 et 19 ka BP, la tendance générale est une augmentation de la température, de 13 à 23 °C. Entre 19 et 16 ka BP, une décroissance de la température s'enregistre. Ces tendances globales sont cependant interrompues par des changements rapides et brusques de la température (Tab. 2). Entre 16 et 14,4 ka BP, les fluctuations de températures sont plus faibles, et la température moyenne de l'été était d'environ 14 °C. Cette période correspond au minimum de température de la séquence, ce qui est également enregistré dans le

pollen du même site (Pérez-Obiol et Julià, 1994). Entre 14,4 et 12 ka BP, la courbe de température enregistre l'amélioration climatique des interstades Bølling/Allerød du Tardiglaciaire, avec des températures moyennes de l'été pouvant atteindre la valeur actuelle de 23 °C. Centré à ~11,6 ka BP, l'événement froid du Dryas récent est bien marqué, avec un minimum de température de 14,5 °C. Il est suivi de l'Holocène au cours duquel les températures fluctuaient autour de la valeur actuelle de 23 °C.

Cette courbe a été comparée à d'autres enregistrements quantifiés de la température pour divers sites du pourtour de l'Atlantique nord (Wansard, 1996a).

### 6.3. COMPARAISON ENTRE TEMPERATURES ESTIVALES DE L'EAU ET DONNEES POLLINIQUES

#### 6.3.1. Entre 30 et 14,4 ka BP (Fig. 6)

D'après le pollen, la période comprise entre ~30 et 14,4 ka BP était, à La Draga, caractérisée par un milieu steppique. A l'exception des fluctuations de *Pinus*, le couvert végétal est resté monotone. Or, entre 24 et 17 ka BP, la température de l'eau en été, déduite du rapport  $(Mg/Ca)$  des ostracodes, montre des fluctuations nombreuses et brèves, dont certaines ont atteint la valeur actuelle de 23 °C.

Les facteurs climatiques qui déterminent l'expansion d'une steppe restent à préciser (Pérez-Obiol & Julià, 1994). Selon Follieri *et al.* (1988), la température ne serait pas un paramètre significatif de la formation des steppes du sud de l'Europe. A La Draga, selon les températures d'été, la steppe glaciaire n'a pas dû résulter d'un froid rigoureux. Son développement trouverait dès lors son origine dans une aridité croissante, en accord avec l'hypothèse de Follieri *et al.* (1988).

Par ailleurs, les améliorations rapides de la température déduites du rapport  $(Mg/Ca)$  de *C. torosa*, n'ont pas conduit au développement de la forêt. Deux hypothèses pourraient l'expliquer:

- ces augmentations de température n'étaient pas accompagnées d'une diminution suffisante d'aridité pour permettre à la forêt de se réinstaller. Cette hypothèse ne peut être vérifiée par les ostracodes de La Draga. Leur géochimie ne peut enregistrer les phases d'aridité dans le lac de Banyoles dont l'alimentation est en permanence restée sous-lacustre et à chimie pratiquement constante;
- les variations de températures étaient trop rapides, estimées à quelques centaines d'années voire moins,

RECONSTRUCTION PALEOENVIRONNEMENTALE DES DERNIERS 30 000 ANS

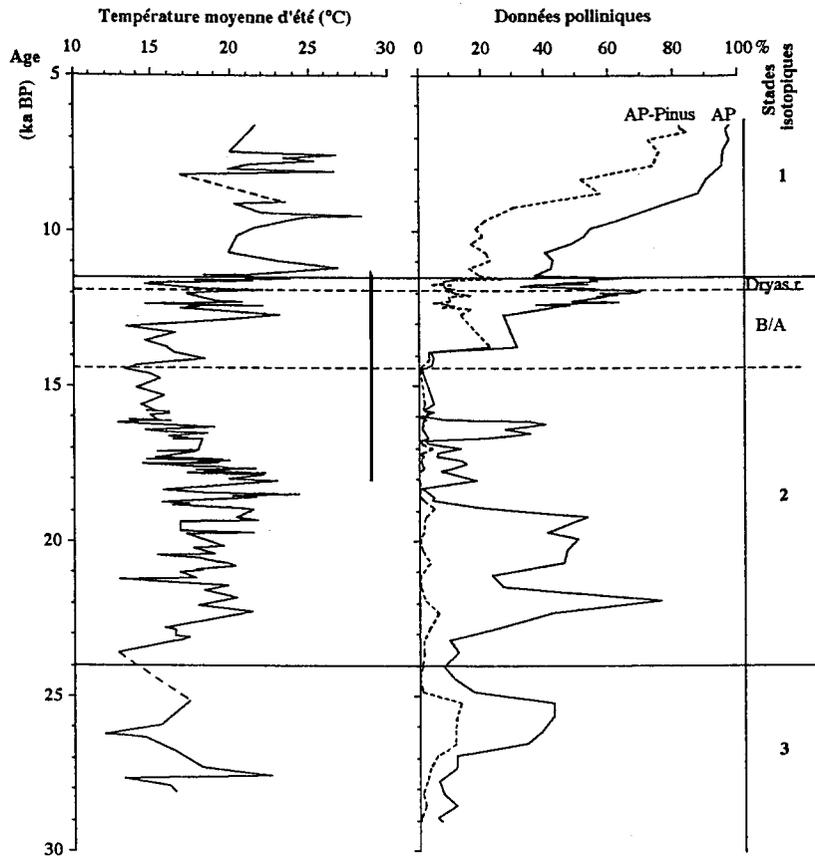


Figure 6. Evolution de la température moyenne de l'été quantifiée à partir des rapports (Mg/Ca) de *C. torosa* de La Draga. Comparaison avec les courbes AP (pollen d'arbres) et AP-Pinus de la même séquence (Dryas r. = Dryas récent - B/A pour Bølling/Allerød).

Augmentations de température				Diminutions de température			
Age	Durée	Température	≠ temp.	Age	Durée	Température	≠ temp.
(ka BP)	années	(°C)	(°C)	(ka BP)	années	(°C)	(°C)
23,6 - 22,2	~1400	12,9 - 21,3	8,4	21,4 - 21,25	~150	19,8 - 12,9	6,9
21,2 - 20,8	~400	12,9 - 20,3	7,4	20,8 - 20,45	~350	20,3 - 15,3	5
20,45 - 19,7	~750	15,3 - 21,4	6,1				
19,35 - 19,3	~50	16,8 - 21,7	4,9	19 - 18,7	~300	21,3 - 15,6	5,7
18,7 - 18,5	~200	15,6 - 24,4	8,8	18,5 - 18,35	~150	24,4 - 15,7	8,7
18,35 - 18	~350	15,7 - 23	7,3	17,65 - 17,5	~150	21,6 - 14,4	7,2
17,5 - 17,4	~100	14,4 - 19,9	5,5				

Tableau 2. Principales fluctuations de la température moyenne de l'été, entre 24 et 17,3 ka BP à La Draga.

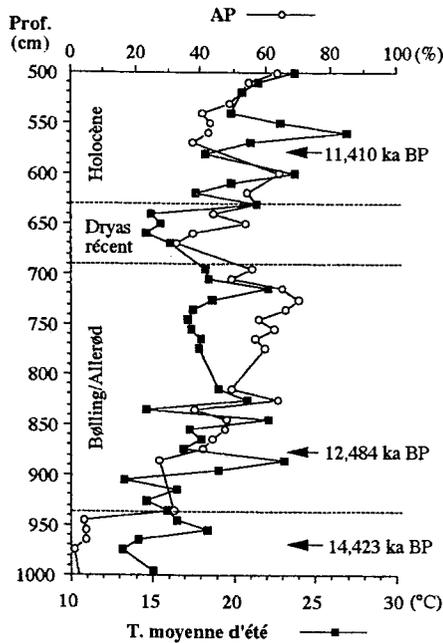


Figure 7. Comparaison entre température moyenne de l'été et pourcentages d'AP, pour le Tardiglaciaire de La Draga.

pour permettre à la végétation de réagir. Pour de telles durées brèves, le couvert végétal montre une trop grande inertie pour être perçu dans les spectres polliniques.

L'étude pollinique en cours, qui consiste à resserrer la maille des résultats polliniques au droit des pics de températures des stades isotopiques 3 et 2, permettra de tester cette seconde hypothèse. Dès à présent, il semble bien que, dans le détail, la végétation réponde avec retard à la répétition successive de plusieurs maxima de températures (Warny et Wansard, en préparation).

### 6.3.2. Au cours du Tardiglaciaire

Au cours du Tardiglaciaire, une bonne covariation est observée entre la température moyenne de l'eau en été et l'évolution de la courbe des arbres (AP), en dépit de décalages légers entre les deux courbes (Fig. 7):

- vers 14,4 ka BP, l'augmentation de la température d'après la géochimie des ostracodes débute avant l'augmentation des AP;
- au cours du Bølling/Allerød (14,4 - 11,9 ka BP), les AP augmentent de façon régulière tandis que la courbe de température révèle cinq maxima: 18,4 °C à 14,1 ka BP - 23,1 °C à 12,7 ka BP - 22,1 °C à 12,4 ka BP - 20,8 °C à 12,3 ka BP - 22,1 °C à 11,9 ka BP, et quatre minima: 13,3 °C à 13,1 ka BP - 16,9 °C à 12,5 ka BP - 17,2 °C à 12 ka BP. Seule la fluctuation entre 12,4 et 12,3 ka BP est marquée par le pollen. L'enregistrement de la dynamique de la recolonisation forestière déduite des spectres polliniques n'a donc pas la sensibilité des

enregistrements paléoclimatiques tirés de l'analyse géochimique des ostracodes. C'est ici un exemple de l'inertie inhérente à un changement de couvert végétal en réponse à un changement rapide du climat.

La diminution de température du Dryas récent débute dès 11,9 ka BP, anticipée de peu par celle des AP qui débute à 11,96 ka BP. L'évolution du couvert végétal répond aux modifications du climat non seulement en terme de température mais encore en terme d'humidité - humidité de l'air, du sol, évapotranspiration/précipitation - de sorte qu'il est difficile de distinguer lequel de ces deux paramètres climatiques, température et humidité, agit de manière prépondérante sur une modification du couvert végétal. La dégradation relativement précoce, ~60 ans, du couvert végétal du début du Dryas récent ne serait pas liée à une diminution de la température puisque, au contraire, celle-ci augmente encore comme indiqué par la géochimie des ostracodes. La dégradation de la végétation résulterait ainsi d'une diminution de l'humidité, paramètre que n'enregistrent pas les ostracodes à La Draga. C'est seulement quelque 60 ans plus tard, qu'est survenue une baisse de la température, enregistrée par les ostracodes. De même, une augmentation de l'humidité, précédant celle de la température, pourrait expliquer le début de la reforestation, enregistré dès 11,7 ka BP, soit avant la fin du maximum froid du Dryas récent enregistré à 11,65 ka BP selon les ostracodes.

## 7. CONCLUSIONS

Les datations <sup>14</sup>C et U/Th, et l'évolution paléovégétale, reconstituée par l'étude pollinique, fixent avec une bonne précision le cadre climato-stratigraphique de la séquence espagnole de La Draga.

L'évolution du rapport (Sr/Ca) de l'eau à La Draga est reconstituée à partir du rapport (Sr/Ca) des valves de *C. torosa*. Au cours des derniers 30.000 ans, plusieurs fluctuations de (Sr/Ca)<sub>eau</sub> sont détectées et quantifiées. L'augmentation la plus rapide, et une des deux plus importante, de (Sr/Ca)<sub>eau</sub> marque le passage du Tardiglaciaire à l'Holocène. Les facteurs qui modifient le rapport (Sr/Ca)<sub>eau</sub> de La Draga doivent encore être précisés. Ces rapports ne sont cependant pas en corrélation avec les rapports (Mg/Ca) de l'eau.

Les contextes hydrologique et chimique du lac actuel de Banyoles permettent d'interpréter les variations du rapport (Mg/Ca) de *C. torosa* fossile en terme de température. L'équation de calibration des températures,

établie à partir des rapports (Mg/Ca) de *Cyprideis torosa* du lac actuel, s'applique donc aux fossiles de la même espèce de la séquence de La Draga. Une courbe quantifiée des paléotempératures est ainsi reconstruite pour les derniers 30.000 ans.

Une comparaison entre les paléotempératures déduites de la géochimie des ostracodes et les données polliniques de La Draga montre qu'entre 30 et 14,4 ka BP, les fluctuations de température étaient trop rapides pour permettre à la végétation de réagir. Au cours du Tardiglaciaire, une bonne covariation s'observe entre pollen et température bien que certaines fluctuations rapides de la températures restent sans équivalent dans le pollen. Cette comparaison illustre un des principaux avantages de l'utilisation de la géochimie des ostracodes: l'enregistrement de fluctuations brèves et rapides des changements climatiques et de l'environnement.

## 8. REMERCIEMENTS

Nos remerciements s'adressent au Prof. G. Seret (UCL), au Dr R. Julià (CSIC, Barcelona) et au Dr P. De Deckker (ANU, Canberra) pour les discussions et critiques fructueuses et leur soutien continu, ainsi qu'à F. Mezquita (Valencia) pour sa détermination des deux espèces de *Paralimnocythere*. Que M. Bravin, M.-J. Detinne et A. Lannoye trouvent ici une marque de notre reconnaissance pour l'aide technique précieuse qu'ils nous ont apportée. Nos remerciements s'adressent également à A. Iserentant (Sciences du Sol, UCL) pour sa disponibilité et sa compétence dans la recherche analytique des éléments en traces. La recherche a été financée par la CEE (programmes Euromaar et Epoch) et par le SSTC (programme belge d'impulsion Global Change).

## 9. BIBLIOGRAPHIE

- BARD, E., ARNOLD, M., FAIRBANKS, R. G. & HAMELIN, B., 1993.  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{234}\text{U}$  and  $^{14}\text{C}$  ages obtained by mass spectrometry on corals. *Radiocarbon*, 35: 191-199.
- BISCHOFF, J. L., JULIA, R., SHANKS, W. C. & ROSENBAUER, R. J., 1994. Karstification without carbonic acid: bedrock dissolution by gypsum-driven dedolomitization. *Geology*, 22: 995-998.
- CANALS, M., GOT, H., JULIA, R. & SERRA, J., 1990. Solution-collapse depressions and suspensates in the limnocratic lake of Banyoles (NE Spain). *Earth Surface Processes and Landforms*, 15: 243-254.
- CHIVAS, A. R., DE DECKKER, P. & SHELLEY, J. M. G., 1983. Magnesium, strontium and barium partitioning in non-marine ostracode shells and their use in paleoenvironmental reconstructions-a preliminary study. In R.F. Maddocks, éd., *Applications of Ostracoda*. University Houston Geosciences, p 238-249.
- CHIVAS, A. R., DE DECKKER, P. & SHELLEY, J. M. G., 1985. Strontium content of ostracods indicates lacustrine palaeosalinity. *Nature*, 316: 251-253.
- CHIVAS, A. R., DE DECKKER, P. & SHELLEY, J. M. G., 1986a. Magnesium and strontium in non-marine ostracod shells as indicators of palaeosalinity and palaeotemperature. *Hydrobiologia*, 143: 135-142.
- CHIVAS, A. R., DE DECKKER, P. & SHELLEY, J. M. G., 1986b. Magnesium content of non-marine ostracod shells: a new palaeosalinometer and palaeothermometer. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 54: 43-61.
- CHIVAS, A. R., DE DECKKER, P., CALI, J. A., CHAPMAN, A., KISS, E. & SHELLEY, J. M. G., 1993. Coupled stable-isotope and trace-element measurements of lacustrine carbonates as paleoclimatic indicators. In Swart P.K., Lohmann K.C., McKenzie J. and Savin, eds., *Climate change in continental isotopic records*. American Geophysical Union, *Geophysical Monograph* 78, p. 113-121.
- COHEN, A. S. & NIELSEN, C., 1986. Ostracodes as Indicators of Paleohydrochemistry in Lakes: A Late Quaternary Example from Lake Elmenteita, Kenya. *Palaios*, 1: 601-609.
- CORREGE, T., 1993. Preliminary results of paleotemperature reconstruction using the magnesium to calcium ratio of deep-sea ostracode shells from the Late Quaternary of Site 822, Leg 133 (Western Coral Sea). *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 133: 175-180.
- DEAN, W. E., 1981. Carbonate minerals and organic matter in sediments of modern north temperate hard-water lakes. *SEPM Special Publication n° 31*: 213-231.
- DWYER, G. S., CRONIN, T. M., BAKER, P. A., RAYMO, M. E., BUZAS, J. S. & CORREGE, T., 1995. North Atlantic Deepwater Temperature Change During Late Pliocene and Late Quaternary Climatic Cycles. *Science*, 270: 1347-1351.
- ENGSTROM, D. R., & NELSON, S. R., 1991. Paleosalinity from trace metals in fossil ostracodes compared with observational records at Devils Lake, North Dakota, USA. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 83: 295-312.
- FOLLIERI, M., MAGRI, D. & SADORI, L., 1988. 250,000-year pollen record from Valle di Castiglione (Roma). *Pollen et Spores*, 20: 329-356.
- FORESTER, R. M., 1983. Relationship of two lacustrine ostracode species to solute composition and salinity: Implications for paleohydrochemistry. *Geology*, 11: 435-

438.

GIBERT, E., ARNOLD, M., CONRAD, G., DE DECKKER, P., FONTES, J.-C., GASSE, F. & KASSIR, A., 1990. Retour des conditions humides au Tardiglaciaire au Sahara septentrional (sebkha Mellala, Algérie). *Bulletin de la Société géologique de France*, t. VI, 3: 497-504.

HOLMES, J. A., 1996. Trace-element and stable-isotope geochemistry of non-marine ostracod shells in Quaternary palaeoenvironmental reconstruction. *Journal of Paleolimnology*, 15: 223-235.

JULIA, R., 1980. La conca lacustre de Banyoles-Besalu. Monografies del Centre d'Estudis Comarcals de Banyoles, 188 p.

MARTINSON, D. G., PISIAS, N. G., HAYS, J. D., IMBRIE, J., MOORE, T. C. & SHACKLETON, N. J., 1987. Age dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high-resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy. *Quaternary Research*, 27: 1-29.

NEALE, J. W., 1988. Ostracods and palaeosalinity reconstruction. In De Deckker, Colin & Peypouquet, éd., *Ostracoda in the Earth Sciences*. Elsevier, p. 125-155.

PEREZ-OBIOL, R. & JULIA, R., 1994. Climatic change on the Iberian Peninsula recorded in a 30,000-yr pollen record from Lake Banyoles. *Quaternary Research*, 41: 91-98.

PEYPOUQUET, J.-P., CARBONEL, P. & DE HEINZELIN, J., 1979. Les Ostracodes indicateurs de l'évolution des environnements lacustres de la fin du Cénozoïque dans la branche orientale du Rift africain. *Bulletin de l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine*, 25: 201-219.

PLANAS, M. D., 1973. Composicion, ciclo y productividad del fitoplancton del lago de Banyoles. *Oecologia aquatica*, 1: 3-106.

ROCA, J. & WANSARD, G., soumis. Temperature influence on development and calcification of *Herpetocypris brevicaudata* Kaufmann, 1900 (Crustacea: Ostracoda) under experimental conditions.

TURPEN, J. B. & ANGELL, R. W., 1971. Aspects of moulting and calcification in the ostracod *Heterocypris*. *Biological Bulletin*, 140: 331-338.

WANSARD, G., 1995. Mise au point d'une méthode de quantification des paléotempératures par la géochimie des éléments en traces dans les valves d'ostracodes lacustres. *Thèse inédite*, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, 251 p. + annexes.

WANSARD, G., 1996a. Quantification of paleotemperature changes during isotopic stage 2 in the La Draga continental sequence (NE Spain) based on the Mg/Ca ratio of freshwater ostracods. *Quaternary Science Reviews*, 15: 237-245.

WANSARD, G., 1996b. Nouvelle approche de la

quantification des paléotempératures à partir du rapport (Mg/Ca) des valves d'ostracodes lacustres. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, t. 323, série IIa: 493-500.

WHATLEY, R., 1983. The application of Ostracoda to palaeoenvironmental analysis. In R.F. Maddocks, éd., *Applications of Ostracoda*. University Houston Geosciences, p 51-77.

Manuscrit reçu le 22.09.1996 et accepté pour publication le 30.10.1996.