

Systematic Palaeontology [Vertebrate Palaeontology] / Paléontologie systématique

A new marine fish fauna from the pre-evaporitic Messinian of Gavdos Island (Greece)

Jean Gaudant ^{a,*}, Nikos Tsaparas ^b, Assimina Antonarakou ^b, Hara Drinia ^b,
Simona Saint-Martin ^{c,d}, Michael D. Dermitzakis ^b

^a UMR 5143 du CNRS, 17, rue du Docteur-Magnan, 75013 Paris, France

^b National and kapodistrian university of Athens, faculty of geology and geoenvironment, panepistimiopolis, 157 84, Athens, Greece

^c Laboratoire de paléontologie, université de Bucarest, 1, boulevard Nicolae-Balcescu, Bucarest, Roumanie

^d Département « histoire de la Terre », Muséum national d'histoire naturelle, 8, rue Buffon, 75005 Paris, France

Received 8 August 2005; accepted after revision 5 December 2005

Available online 02 May 2006

Presented by Philippe Taquet

Abstract

The occurrence of fossil fishes in the Messinian diatomites of Gavdos Island (Greece) was recently observed. This fish fauna is dominated by the Myctophids, which constitute more than two thirds of the collected material. Among them, *Myctophum* (s. l.) *licatae* (Sauvage) is by far the most abundant, with more than 50% of the specimens. Although the mesopelagic components are overwhelmingly dominant, epipelagic fishes, like *Syngnathus* cf. *albyi* Sauvage, are also present. The composition of this fish fauna is indicative of a sedimentation influenced by the action of upwelling currents, an interpretation that is also suggested by the composition of the diatom flora. **Pour citer cet article : J. Gaudant et al., C. R. Palevol 5 (2006).**

© 2006 Académie des sciences. Published by Elsevier SAS. All rights reserved.

Résumé

La présence de poissons fossiles dans les diatomites messiniennes de l'île de Gavdos (Grèce) a été observée récemment. Cette ichthyofaune est dominée par les Myctophidae qui constituent plus des 2/3 du matériel récolté. Parmi eux, l'espèce *Myctophum* (s. l.) *licatae* Sauvage est de beaucoup la plus abondante avec plus de 50% du nombre d'individus étudiés. Bien que les composants mésopélagiques soient très fortement dominants, les poissons épipélagiques, comme *Syngnathus* cf. *albyi* Sauvage, sont également présents. La composition de cette ichthyofaune traduit une sédimentation influencée par l'action de remontées d'eau profonde, comme le suggère également la composition de la flore diatomitique. **To cite this article: J. Gaudant et al., C. R. Palevol 5 (2006).**

© 2006 Académie des sciences. Published by Elsevier SAS. All rights reserved.

Keywords: Fishes; Teleosts; Messinian; Palaeoecology; Gavdos Island; Greece

Mots clés : Poissons ; Téléostéens ; Messinien ; Paléocécologie ; Île de Gavdos ; Grèce

* Corresponding author.

E-mail address: gaudant@ipgp.jussieu.fr (J. Gaudant).

Version française abrégée

Introduction

Alors que la présence de poissons dans le Tortonien de Gavdos était déjà connue depuis plus d'un siècle [34], leur découverte dans les diatomites messiniennes de cette île est beaucoup plus récente. Le Messinien préévaporitique de Gavdos, qui affleure au nord de l'île, au sommet de la coupe Metochia C (Fig. 1), est principalement constitué par une alternance de diatomites argileuses, de marnes diatomitiques et de diatomites à structure laminaire. Son épaisseur égale 14,5 m.

Compte tenu des résultats d'études antérieures [1,6,9,15,17,18], il est possible de préciser les points suivants :

- le dépôt de la base de la séquence diatomitique est postérieur à la dernière occurrence de *Globorotalia nicolae*, un événement biostratigraphique qui est daté à 6,7 Ma ;
- au sein de la séquence diatomitique ont été observés les faits suivants : (1) première présence abondante de *Globigerina obesa* (environ 6,6 Ma), (2) dernière occurrence de *Globorotalia conomiozea* (6,5 Ma), (3) première occurrence de *Turborotalita multiloba* (6,4 Ma), (4) changement du sens d'enroulement (de dextre à senestre) de *Neogloboquadrina acostaensis* (6,3 Ma), (5) afflux de *Globorotalia scitula* (6,2 Ma), (6) dominance des formes senestres de *Neogloboquadrina acostaensis* ; (7) dernier afflux de *N. acostaensis* senestres ;
- la fin du dépôt de la séquence diatomitique se situe ainsi aux environs de 6,0 Ma.

L'ichthyofaune

L'ichthyofaune recueillie dans les diatomites messiniennes de Gavdos est constituée d'environ 75 spécimens généralement plus ou moins fragmentaires. Elle se compose comme suit :

Famille Clupeidae

Genre *Alosa* Linck, 1790

Alosa sp.

Cinq écailles isolées, dont la surface est divisée par une série de sillons parallèles et dont la région centrale porte des ponctuations, indiquent la présence du genre *Alosa* Linck dans les diatomites messiniennes de Gavdos.

Famille Sternoptychidae

Genre *Maurolicus* Cocco, 1838

Maurolicus muelleri (Gmelin, 1789)

Seuls six spécimens fragmentaires, dont deux têtes isolées, soit 8% du matériel étudié, indiquent la présence du genre *Maurolicus* Cocco dans le Messinien de Gavdos.

Famille Paralepididae

Genre *Paralepis* Cuvier, 1817

Paralepis albyi (Sauvage, 1880)

(Fig. 2, 1)

Quatre spécimens fragmentaires, soit 5,3% du nombre de pièces observées, ont été récoltés dans le Messinien de Gavdos. La tête du plus grand a une longueur égale à environ 160 mm, ce qui correspond à une longueur standard d'environ 600 mm.

Famille Myctophidae

Genre *Myctophum* Rafinesque, 1810 (s. l.)

Myctophum licatae (Sauvage, 1870)

(Fig. 2, 2)

Cette espèce est de beaucoup la plus abondante parmi celles que nous avons reconnues dans les diatomites messiniennes de Gavdos. Nous en avons identifié une quarantaine de spécimens, soit 53,3% du nombre total d'individus récoltés. Elle est représentée par des individus dont la longueur standard varie de 28 à 55 mm, avec une fréquence maximale située entre 35 et 40 mm. Le corps est élancé, sa hauteur maximale étant comprise 3,5 à 5,4 fois dans la longueur standard. Il n'a pas été possible d'observer la présence de photophores sur les écailles, qui sont relativement fines.

Myctophum dorsale (Sauvage, 1870)

Avec neuf spécimens plus ou moins fragmentaires (soit 12% du matériel récolté), cette espèce est la seconde, par ordre d'abondance, dans le Messinien diatomitique de Gavdos. Elle diffère de la précédente par ses écailles plus épaisses, dont certaines, principalement situées le long du bord ventral du corps, portent de gros photophores.

Famille Bregmacerotidae

Genre *Bregmaceros* Thompson, 1840

Bregmaceros albyi (Sauvage, 1880)

(Fig. 2, 3)

Alors qu'elle est abondante dans le Tortonien de Gavdos, cette espèce est assez rare dans les diatomites messiniennes, dans lesquelles nous avons seulement trouvé sept spécimens (soit 9,3% du matériel récolté). Leur longueur standard varie de 28,5 à 46,5 mm, ce qui s'accorde bien avec les tailles observées dans le Tortonien de Gavdos.

Famille Centriscidae

Genre *Amphisile* Cuvier, 1816

Amphisile sp.

(Fig. 2, 4)

Une tête isolée de petite taille indique la présence d'un Centriscidae dans le Messinien diatomitique de Gavdos. Il semble s'agir d'un représentant du genre *Amphisile* Cuvier.

Famille Syngnathidae

Genre *Syngnathus* Linné, 1758

Syngnathus albyi Sauvage, 1870

Six opercules isolés et quelques écussons de l'armure dermique témoignent de la présence de Syngnathidae dans les diatomites messiniennes de Gavdos. Ils ne diffèrent en rien des restes similaires découverts dans le Tortonien de Gavdos et dans les autres gisements messiniens de Méditerranée.

Famille Trichiuridae

Genre *Lepidopus* Gouan, 1770

Lepidopus sp.

La présence du genre *Lepidopus* Gouan n'est attestée dans le Messinien diatomitique de Gavdos que par une pièce fragmentaire montrant le dentaire et un pré-maxillaire incomplet portant une forte dent caniniforme.

Signification paléocéologique de l'ichthyofaune

En dépit d'une plus faible diversité taxonomique, puisque seulement une dizaine d'espèces y a été observée, l'ichthyofaune du Messinien diatomitique de Gavdos présente des similitudes évidentes avec celles de plusieurs gisements classiques du Messinien pré-évaaporitique du bassin méditerranéen. On y a en effet observé 65,3% de Myctophidae – parmi lesquels l'espèce *Myctophum* (s. l.) *licatae* (Sauvage) représente à elle seule 53,3% du nombre d'individus récoltés –, qui sont principalement associés à *Bregmaceros albyi* (Sauvage) (9,3%), *Maurolicus muelleri* (8%) et *Paralepis albyi* (Sauvage) (5,3%). Ces pourcentages sont à comparer à ceux relevés dans les gisements siciliens de Licata [3] et de Masseria il Salto, près de Caltagirone [12], de Senigallia (Italie) [10] et de Columbares (Espagne) [11]. Ces pourcentages sont regroupés dans le Tableau 1. Comme nous l'avons déjà souligné, tous ces gisements se sont formés à proximité relative de la côte, à des profondeurs relativement modérées, dans un environnement ouvert sur une mer profonde soumise à l'action de remontées d'eau profonde.

On notera que quelques ptéropodes ont également été récoltés, associés aux poissons actinoptérygiens, dans la partie médiane de la série diatomitique : *Cavolinia gypsorum* (Bellardi), *Cavolinia* sp. et *Diacria* cf. *trispinosa* (de Blainville) [détermination Irene Zorn, Vienne, Autriche]. D'après la répartition actuelle des genres *Cavolinia* Abildgaard et *Diacria* Gray, ces ptéropodes sont des formes océaniques vivant dans les

eaux de surface, sous des climats de type tropical à subtropical.

La flore diatomitique

L'étude de plusieurs échantillons provenant de la partie moyenne à supérieure de la séquence diatomitique a montré que :

- la flore diatomitique comporte au moins 36 espèces de Centriques, appartenant à 13 genres et 19 espèces de Pennées représentant 10 genres différents ;
- l'espèce *Thalassionema nitzschioides* (48,6 et 80,2%) est dominante dans deux échantillons, alors qu'*Actinocyclus curvulatus* (47,8%) et *Rhizosolenia hebetata* (47,6%) sont les plus abondantes dans deux autres échantillons ;
- les taxons planctoniques sont massivement prédominants : ils constituent 97 à 100% du matériel étudié. Les espèces néritico-océaniques représentent 68 à 99%, contre moins de 3% pour les taxons benthiques.

La flore diatomitique messinienne de Gavdos caractérise donc un environnement marin relativement proche du rivage, soumis à l'influence de remontées d'eau profonde, comme l'indique l'abondance, dans deux des échantillons étudiés, de l'espèce *Thalassionema nitzschioides* [4,27,28] et celle, dans un autre échantillon, d'*Actinocyclus curvulatus*, une espèce caractéristique des eaux océaniques relativement froides [5].

Les foraminifères benthiques

L'étude des foraminifères benthiques a permis d'identifier 83 espèces dans le Messinien pré-évaaporitique de Gavdos. En dépit d'importantes fluctuations d'un échantillon à l'autre, les deux familles des Boliviniidae et des Buliminidae sont globalement dominantes dans l'ensemble de la séquence. Plusieurs types d'associations ont été observés dans la coupe :

- le premier est caractérisé par une forte diversité taxonomique, ce qui indique un milieu marin oligotrophique dépourvu de stress ;
- le second, composé uniquement d'espèces du groupe de *Bulimina aculeata*, présente une faible diversité. Il correspond à des environnements benthiques généralement instables, riches en nutriments et pauvres en oxygène ;
- une association d'un troisième type, dominée par l'espèce *Bolivina plicatella*, a été observée à la base

de la séquence. Elle suggère un accroissement temporaire de la salinité ;

- enfin, une association d'espèces, dominée par le groupe de *Bolivina spathulata* (*B. spathulata* group, *Uvigerina* spp. et *Anomalinoidea* sp.), qui est principalement développée dans la partie médiane de la séquence, traduit l'existence d'une faible teneur en oxygène, associée à une haute productivité liée à des épisodes de remontées d'eau profonde.

Dans l'ensemble, la faune de foraminifères benthiques du Messinien pré-évaporitique de Gavdos indique des conditions bathymétriques pouvant varier de 100 à 600–700 m, ce qui englobe la zone externe du plateau continental et la partie supérieure du talus continental

1. Introduction

Whereas the presence of fossil fishes in the Tortonian of Gavdos was already known since more than one century [34], the occurrence of Messinian fossil fishes at Gavdos was observed rather recently in the pre-evaporitic diatomitic sequence outcropping at the top of Metochia C section (Fig. 1). There, a rhythmically layered succession of hemipelagic marls and sapropels is overlain in stratigraphic continuity by cyclically bedded diatomites of Messinian age.

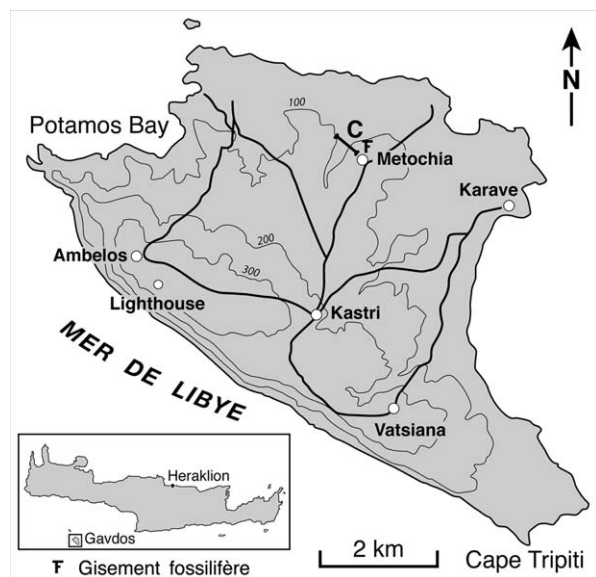


Fig. 1. Schematic map of Gavdos Island showing the location of the Metochia C section, the upper part of which is the diatomitic sequence that has yielded the Messinian fish fauna.

Fig. 1. Carte schématique de l'île de Gavdos montrant l'emplacement de la coupe Metochia C, dont la partie supérieure est constituée par la séquence diatomitique d'où provient l'ichthyofaune messinienne.

The diatomitic sequence of Metochia, which has a thickness of 14.5 m, is characterized by alternations of clayey diatomites, white diatomites and diatomaceous laminated marls, locally associated with marly limestones. At the top of the section, grey limestones are interbedded with clayey diatomites and diatomaceous marls. Although Perez-Folgado et al. [24] used the term 'sapropel' instead of 'diatomaceous laminated marls', these layers cannot be considered as true sapropels, since they are really thin, faintly laminated reddish layers that mark the transition from clayey diatomites to genuine diatomites.

The age of the diatomites was first determined by Triantaphyllou et al. [35], who studied the calcareous nannofossils of the Metochia diatomitic sequence. They concluded that the contemporaneous presence of simple primitive ceratolithids (*Amaurolithus delicatus*, *A. primus*, *A. amplificus*) and *Discoaster quinqueramus*, *D. pentaradiatus*, and of the planktonic foraminifer *Globorotalia conomiozea*, together with the absence of *Reticulofenestra rotaria*, allows the correlation of the diatomites with the CN9b biozone [23] and with the upper part of NN11 [20].

The biostratigraphical events used for dating the diatomitic succession of the Metochia section were first reported by Hilgen and Krijgsman [15], and later refined and expanded by Drinia et al. [9].

The Tortonian–Messinian boundary was identified in the Metochia C section; it is marked by the first occurrence of *Globorotalia miotumida* group at cycle M73 dated at about 7.2 Ma [1,18]. The beginning of the deposition of the diatomitic series is dated, using the astronomically calibrated time scale for the Messinian, at 6.6 Ma. The first diatomitic layer was deposited after the last occurrence of *Globorotalia nicolae*, a biostratigraphical event which is dated at 6.7 Ma. A number of other first and second-order bioevents provide additional information: (1) the first abundant occurrence of *Globigerina obesa* (about 6.6 Ma), (2) the last occurrence of *Globorotalia conomiozea* (6.5 Ma), (3) the first occurrence of *Turborotalita multiloba* (6.4 Ma), (4) dextral to sinistral coiling change of *Neogloboquadrina acostaensis* (6.3 Ma), (5) influx of *Globorotalia scitula* (6.2 Ma), (6) dominance sinistral forms interval of *Neogloboquadrina acostaensis*, and (7) the last influx of sinistral *N. acostaensis*. All demonstrate that the diatomitic sequence where fish fauna is abundant ends at about 6.0 Ma. This chronostratigraphical framework relies on ages proposed for the bioevents identified by Blanc-Valleron et al. [6], Hilgen and Krijgsman [15] and Krijgsman et al. [17] in different Messinian sections of the Mediterranean.

2. The fish fauna

The present study relies on about 75 more or less complete specimens of fossil fishes which were collected in the diatomites.

Family Clupeidae

Genus *Alosa* Linck, 1790

Alosa sp.

Five isolated scales, the surface of which is divided by parallel furrows and punctuated in its central region, indicate the presence of the genus *Alosa* Linck in the Messinian of Gavdos.

Family Sternoptychidae

Genus *Maurolicus* Cocco, 1838

Maurolicus muelleri (Gmelin, 1789)

Two isolated heads and four body fragments exhibit characters that are observed in better preserved representatives of *Maurolicus muelleri* (Gmelin). However, it is impossible to give of them any documented anatomical description.

Family Paralepididae

Genre *Paralepis* Cuvier, 1817

Paralepis albyi (SAUVAGE, 1880)

(Fig. 2, 1)

Four incomplete specimens (i.e. 5.3% of the collected material) demonstrate the occurrence of a Paralepidid in the Messinian of Gavdos. The largest one had a standard length of about 600 mm, as suggested by a slightly disarticulated large head, the length of which equals 160 mm. In this head, it is possible to see the typical long and narrow skull roof, the maximum width of which is about a quarter of its length.

Family Myctophidae

Genus *Myctophum* Rafinesque, 1810 (s. l.)

Myctophum licatae (Sauvage, 1870)

(Fig. 2, 2)

With 40 collected specimens (i.e. 53.3% of the fish material), this species is by far the most abundant one found in the Messinian diatomites of Gavdos. The standard length of these fishes ranges from 28 to 55 mm, with a maximum frequency between 35 and 40 mm. The body is rather slender, its maximum height being generally included 3.5 to 5.4 times in standard length. The vertebral column includes about 36 vertebrae, 19 or 20 being postabdominal. Twelve pterygiophores are present in the endoskeleton of the dorsal fin. The body was covered by rather thin scales which are generally poorly preserved, so that it is not possible to observe any light organ.

Myctophum dorsale (Sauvage, 1870)

With nine more or less complete specimens (i.e. 12% of the collected fish material), this species is the

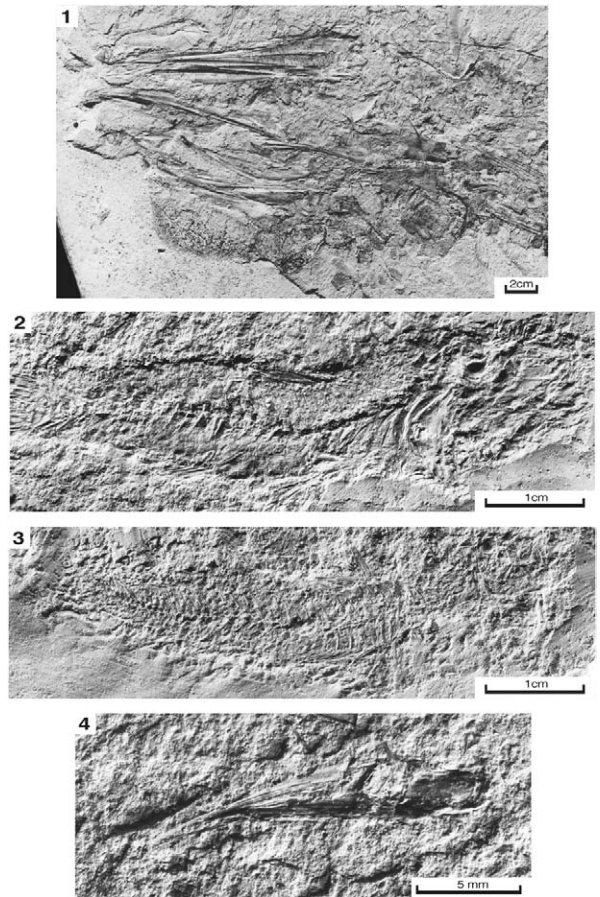


Fig. 2. Messinian fish fauna of Gavdos Island. 1. *Paralepis albyi* (Sauvage). Head. 2. *Myctophum* (s. l.) *licatae* (Sauvage). General view of body. 3. *Bregmaceros albyi* (Sauvage). General view of body. 4. *Amphisile* sp. Head.

Fig. 2. Ichthyofaune messinienne de l'île de Gavdos. 1. *Paralepis albyi* (Sauvage). Tête. 2. *Myctophum* (s. l.) *licatae* (Sauvage). Vue générale. 3. *Bregmaceros albyi* (Sauvage). Vue générale. 4. *Amphisile* sp. Tête.

second most abundant found in the Messinian diatomites of Gavdos. This species differs from the former one by its thicker scales which may bear rather large light organs, especially along the ventral edge of the body.

Family Bregmacerotidae

Genus *Bregmaceros* Thompson, 1840

Bregmaceros albyi (Sauvage, 1880)

(Fig. 2, 3)

Whereas it is abundant in the Tortonian of Gavdos, this species is rather scarce in the Messinian diatomites, in which only seven skeletons were found (i.e. 9.3% of the fish material). Their standard length ranges from 28.5 to 46.5 mm, which is in good agreement with the sizes observed in the Tortonian of Gavdos.

Family Centriscidae

Genus *Amphisile* Cuvier, 1816*Amphisile* sp.

(Fig. 2, 4)

A small isolated head bears witness of the occurrence, in the diatomitic Messinian of Gavdos island, of a Centriscid which was probably belonging to the genus *Amphisile* Cuvier.

Family Syngnathidae

Genus *Syngnathus* Linné, 1758*Syngnathus albyi* Sauvage, 1870

Six isolated opercula and some dermal scutes demonstrate the occurrence of pipe fishes in the diatomitic Messinian of Gavdos. They are exactly similar to the corresponding remains found in the Tortonian and also in many Messinian localities of the Mediterranean.

Family Trichiuridae

Genus *Lepidopus* Gouan, 1770*Lepidopus* sp.

A dentary and an incomplete premaxillary bearing a strong fang indicate the occurrence of the genus *Lepidopus* Gouan in the diatomitic Messinian of Gavdos Island.

3. Palaeoecological significance of the Messinian fish fauna from Gavdos

The fish fauna from the Messinian diatomites of Gavdos is strongly dominated by the Myctophids which build up 65.3% of the collected material (among them, *Myctophum* (s.l.) *licatae* (Sauvage) reaches 53.3%). Another meso- to bathypelagic species, *Paralepis albyi* (Sauvage) is present (5.3% of the fish fauna). *Bregmaceros albyi* (Sauvage) (9.3% of the collected material) is a mesopelagic to epipelagic fish that belongs to a recent genus which is mainly distributed through the upper 300 m of the water column [2]. Additionally, *Mauroliscus muelleri* (Gmelin) (8% of the collected material) is a species which is generally living at depths ranging from 100 to 400 m. All these fishes are found together with isolated opercula and dermal scutes of Syngnathids that are preserved in the

same sediments. This demonstrates that the deposition of the diatomites cannot have taken place far from the sea-shore because the living representatives of the recent genus *Syngnathus* L. are mainly living in the sea grass meadows, from where the opercula and scutes were probably transported.

Although it exhibits a relatively low taxonomical diversity, as its species number is limited to about ten species, the fish fauna of the diatomitic Messinian of Gavdos Island exhibits a great similarity with that of several well-known Messinian localities of the pre-evaporitic Messinian of the Mediterranean, as the relative abundance of its main components does not significantly differ from that of specimens found in Sicily, at Licata [3], and Masseria il Salto, near Caltagirone [12], at Senigallia (Italy) [10], and at Columbares (Spain) [11] (Table 1). All these localities are interpreted as generated at moderate depths, rather near the sea-shore, in areas having a direct connexion to a deep open sea in which upwelling phenomena were temporarily active.

It should be noted that some pteropods were also collected at Gavdos, together with the actinopterygian fishes, in the middle part of the diatomitic sequence: *Cavolinia gypsorum* (Bellardi), *Cavolinia* sp. et *Diacria cf. trispinosa* (de Blainville) [identification made by Irene Zorn, Wien]. The recent species of *Cavolinia* Abildgaard and *Diacra* Gray are oceanic molluscs living in surface waters under tropical to subtropical climates.

4. The diatomitic flora

The examination of several samples collected in the middle to upper part of the diatomitic sequence (between 3 and 8 m under the calcareous bed overlying the diatomites) has shown that:

- (1) the diatomitic flora includes at least 36 species of Centrics belonging to 13 genera and 19 species from 10 genera of Pennates;
- (2) the species *Thalassionema nitzschioides* is dominant in two samples (48.6% and 80.2%), whereas the

Table 1

The Messinian fish fauna of Gavdos Island, compared to those from several other localities of the Mediterranean Basin
Comparaison de l'ichthyofaune messinienne de Gavdos avec celles de plusieurs autres gisements du bassin méditerranéen

Espèces	Gavdos	Licata	Masseria il Salto	Senigallia	Columbares
<i>Myctophum</i> (s.l.) <i>licatae</i> (Sauvage)	53.3%	24.5%	37.0%	32.5%	46.7%
<i>Myctophum</i> (s.l.) <i>dorsale</i> (Sauvage)	24.5%	18.6%	23.2%	22.0%	31.7%
Myctophidae (total)	65.3%	76.7%	74.6%	86.0%	78.7%
<i>Mauroliscus muelleri</i> (Gmelin)	8.0%	1.9%	8.9%	6.1%	0.7%
<i>Paralepis albyi</i> (Sauvage)	5.3%	6.6%	3.8%	3.7%	9.1%
<i>Bregmaceros albyi</i> (Sauvage)	9.3%	0.8%	14.3%	0.8%	3.1%

most abundant species are respectively *Actinocyclus curvatus* (47.8%) and *Rhizosolenia hebetata* (47.6%) in two other samples;

- (3) the planktonic taxa are overwhelmingly dominant in every sample (97 to 100% of the studied material). Among them, the neritic oceanic species range from 68 to 99%, whereas the benthic taxa are always less than 3%.

Consequently, the Messinian diatomitic flora of Gavdos Island characterizes a marine coastal environment that was periodically influenced by upwelling phenomena, as suggested by the abundance of *Thalassionema nitzschioides* in two of the studied samples [4, 27,28], and that of a species which is indicative of rather cold waters (*Actinocyclus curvatus*) in another one [5].

5. The benthic foraminifera

Although they are not abundant, benthic foraminifera are always present in the pre-evaporitic succession of the Metochia section. Wholly, 4536 benthic foraminifera specimens, belonging to 83 different benthic species, were identified from 35 samples of the pre-evaporitic sequence of the Metochia section.

The most representative species of the benthic foraminiferal fauna are: *Bolivina plicatella*, *Bolivina spathulata* group (including *B. spathulata*, *B. dilatata*, *B. tortuosa*), *Bulimina aculeata* group (including *B. aculeata*, *B. elongata*, *B. lappa*), *Elphidium* spp., *Asterigerinata planorbis* and *Gyroidinoides neosoldanii*. Additional and significant species are *Anomalinoidea* sp., *Cibicidoides* spp., *Melonis* sp., *Uvigerina* spp. and *Valvulineria bradyana*.

Boliviniidae and Buliminidae dominate throughout the succession, strongly fluctuating, respectively in the ranges of 0.5–79% and 1–98%. Among the Boliviniidae, *B. plicatella* and *B. spathulata* groups are the most common. *Bolivina plicatella* is relatively abundant in the basal part of the section, displaying peak occurrences at 0.08 m and 3.9 m (76.5% and 64.6% respectively). *Bulimina aculeata* group shows a fluctuating pattern throughout the succession, reaching its highest frequency at 1.4 m (98%). *Gyroidinoides neosoldanii* is only present in the lower part of the record, displaying its highest occurrence at 0.7 m (68%). *Asterigerinata planorbis* and *Elphidium* spp. occur from the base to the top of the section with their highest frequencies in the middle of the succession, at 7.25 and 6.94 m (78% and 46% respectively). *Cibicidoides kullenbergii*, which is the main representative of the *Cibicidoides*

spp. group, is abundant in the middle part of the succession, from 5.1 to 6.94 m, and then shows a fluctuating but diminishing abundance pattern up to the top of the section. Among the other species, *Melonis* sp., *Uvigerina* spp., *Anomalinoidea* sp. and *Valvulineria bradyana* are present along the succession with fluctuating patterns and comparatively low-frequency values.

The statistical analysis of the benthic foraminiferal fauna [9] reveals two distinctly different assemblages dominating throughout the succession: a high diversity assemblage (*A. planorbis* assemblage including *Asterigerinata planorbis*, *Elphidium* spp., *H. boueana*, *Cibicidoides* spp., *Melonis* sp. and *Valvulineria bradyana*) indicating an oligotrophic, stress-free marine environment, and a low-diversity assemblage (*B. aculeata* assemblage including only species belonging to the *B. aculeata* group), which can be explained by the combined effect of increased food availability, oxygen depletion and unstable bottom conditions [8]. In addition, a third assemblage (*B. plicatella* assemblage including *B. plicatella* with *G. neosoldanii*) is recorded in the lower part of the succession, indicating a temporal increase in salinity [16,29], whereas the *B. spathulata* group assemblage (*B. spathulata* group, *Uvigerina* spp. and *Anomalinoidea* sp.), dominating mainly in the middle part of the section, illustrates a low-oxygen environment with high productivity related to local upwelling episodes [7,13,25,31].

For estimating the depositional depth of the studied sediments, we used published data on the recent bathymetric distribution of the most important species. The benthic taxa identified in the section with significant frequency percentages are commonly distributed in the modern Mediterranean areas in depth range of 100–600 m [21,22,32]. The studied succession is mainly dominated by the *Bulimina aculeata* group, indicating a deposition at outer shelf to middle bathyal (100–700 m [26,30,33]), and *Bolivina spathulata* group which has been reported to be widespread in moderately sheltered to exposed, fully marine, inner to outer shelf depths (e.g. Hayward et al. [14]).

High percentages of transported benthic foraminifera mainly of the genus *Elphidium*, normally indicate shallower water depths [19,21,22]. These tests are probably related to sea-level stillstand conditions allowing the development of a coastal environment.

References

- [1] A. Antonarakou, Biostratigraphy and paleoenvironmental implications on Miocene sediments of Eastern Mediterranean (Gavdos Island), PhD thesis, Athens University, 2001. (180 p.)

- [2] U. d'Ancona, G. Cavinato, The fishes of the family Bregmaceridae, *Dana Rep.* 64 (1965) 1–92.
- [3] C. Arambourg, Révision des poissons fossiles de Licata, *Ann. Paléontol.* 14 (1925) 39–132.
- [4] M.A. Barcena, F. Abrantes, Evidence of a high-productivity area off the coast of Málaga from studies of diatoms in surface sediments, *Mar. Micropaleontol.* 35 (1998) 91–103.
- [5] J. Barron, Late Miocene–Early Pliocene paleotemperatures for California from marine diatom evidence, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 14 (1973) 277–291.
- [6] M.-M. Blanc-Valleron, C. Pierre, J.-P. Caulet, A. Caruso, J.-M. Rouchy, G. Cespuglio, R. Sprovieri, S. Pestrea, E. Di Stefano, Sedimentary stable isotopes and micropaleontological record of paleoceanographic changes during the deposition of the Lower Messinian Tripoli Formation of the Giblesemi-Falconara section (Sicily), *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 185 (2002) 255–286.
- [7] M.H. Caralp, Abundance of *Bulimina exilis* and *Melonis barleanum*: relationship to the quality of marine organic matter, *Geo-Mar. Lett.* 19 (1989) 37–43.
- [8] S. de Rijk, F.J. Jorissen, E.J. Rohling, S.R. Troelstra, Organic flux control on bathymetric zonation of Mediterranean benthic foraminifera, *Mar. Micropaleontol.* 40 (2000) 151–166.
- [9] H. Drinia, A. Antonarakou, N. Tsaparas, G. Kontakiotis, Paleocological aspects preceding the Messinian Salinity Crisis: A case from Gavdos Island, 4th Intern. Congress “Environment and identity in the Mediterranean: the Messinian crisis revisited”, Corte, July 2004, Abstracts, p. 33.
- [10] G. d'Erasmo, L'ittiofauna fossile di Senigallia, *Atti R. Accad. Sci. fis. mat. Napoli* 18 (1) (1930) 1–87.
- [11] J. Gaudant, Nouvelles additions à l'ichthyofaune marine du Messinien de la Sierra de Columbares (Province de Murcia, Espagne), *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIA* 320 (1995) 439–446.
- [12] J. Gaudant, J.-P. Caulet, A. Di Geronimo, A. Di Stefano, E. Fournanier, M. Romeo, M.-T. Vénec-Peyré, Analyse séquentielle d'un nouveau gisement de poissons fossiles du Messinien marin diatomitique : Masseria il Salto près de Caltagirone (province de Catane, Sicile), *Géol. Méditerran.* 23 (1996) 117–153.
- [13] A.J. Gooday, Deep-sea benthic foraminiferal species which exploit phytodetritus: characteristic features and controls on distribution, *Mar. Micropaleontol.* 22 (1993) 187–205.
- [14] B.W. Hayward, H.R. Grenfell, C.M. Reid, K.A. Hayward, Recent New Zealand shallow-water benthic foraminifera: taxonomy, ecologic distribution, biogeography and use in paleoenvironmental assessment, *Inst. Geol. Nucl. Sci. Monogr.* 21 (1999) 1–258.
- [15] F.J. Hilgen, W. Krijgsman, Cyclostratigraphy and astrochronology of the Tripoli diatomite formation pre-evaporite Messinian, Sicily, Italy, *Terra Nova* 11 (1999) 16–22.
- [16] H.A. Jonkers, Pliocene benthonic foraminifera from homogeneous and laminated marls on Crete, *Utrecht Micropaleont. Bull.* 31 (1984) 1–179.
- [17] W. Krijgsman, M.-M. Blanc-Valleron, R. Flecker, F.J. Hilgen, T.J. Kouwenhoven, D. Merle, F. Orszag-Sperber, J.-M. Rouchy, The onset of the Messinian salinity crisis in the Eastern Mediterranean Pissouri Basin, Cyprus, *Earth Planet. Sci. Lett.* 194 (2002) 99–310.
- [18] W. Krijgsman, F.J. Hilgen, C.G. Langereis, A. Santarelli, W.J. Zachariasse, Late Miocene magnetostratigraphy, biostratigraphy and cyclostratigraphy in the Mediterranean, *Earth Planet. Sci. Lett.* 136 (1995) 475–494.
- [19] A. Lévy, R. Mathieu, A. Poignant, M. Rosset-Moulinier, M.L. Ubaldo, S. Lebreiro, Foraminifères actuels de la marge continentale portugaise – Inventaire et distribution, *Memorias do Instituto Geologico e Mineiro* 32 (1995) 3–116.
- [20] E. Martini, in: Standard Tertiary and Quaternary calcareous nannoplankton zonation, *Proc. 2nd Plankt. Conf., Roma*, 1970 (1971), pp. 739–785.
- [21] J.W. Murray, in: *Ecology and Palaeoecology of Benthic Foraminifera*, Longman Scientific and Technical, Harlow, UK, 1991, pp. 1–397.
- [22] J.W. Murray, Ecology and distribution of benthic foraminifera, in: J.J. Lee, O.R. Anderson (Eds.), *Biology of Foraminifera*, Academic Press, New York, 1991, pp. 221–254.
- [23] H. Okada, D. Bukry, Supplementary modification and introduction of code numbers of the low-latitude coccolith biostratigraphy zonation (Bukry 1973, 1975), *Mar. Micropaleontol.* 5 (1980) 321–325.
- [24] M. Perez-Folgado, F.J. Sierro, M.A. Barcena, J.A. Flores, A. Vazquez, R. Utrilla, F.J. Hilgen, W. Krijgsman, G.M. Filippelli, Western versus eastern Mediterranean paleoceanographic response to astronomical forcing: a high-resolution microplankton study of precession-controlled sedimentary cycles during the Messinian, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 190 (2003) 317–334.
- [25] F.B. Phleger, A. Soutar, Production of benthic foraminifera in three East Pacific oxygen minima, *Micropaleontology* 19 (1973) 110–115.
- [26] G. Schmiedl, A. Mackensen, P.J. Müller, Recent benthic foraminifera from the eastern South Atlantic Ocean: Dependence on food supply and water masses, *Mar. Micropaleontol.* 32 (1997) 249–288.
- [27] H.J. Schrader, Peruvian coastal primary paleo-productivity during the last 200 000 years, in: C.P. Summerhayes, W.L. Prell, K.C. Emeis (Eds.), *Upwelling Systems: Evolution since the Early Miocene*, *Geol. Soc. Spec. Publ.* 64, 1992, pp. 391–409.
- [28] G. Schuette, J. Schrader, Diatom taphocoenose in the coastal upwelling area of South-West Africa, *Mar. Micropaleontol.* 6 (1981) 131–155.
- [29] M.S. Seidenkrantz, T.J. Kouwenhoven, F.J. Jorissen, N.J. Shackleton, G.J. van der Zwaan, Benthic foraminifera as indicators of changing Mediterranean–Atlantic water exchange in the Late Miocene, *Mar. Geol.* 163 (2000) 387–407.
- [30] B.K. Sen Gupta, M.L. Machain-Castillo, Benthic foraminifera in oxygen-poor habitats, *Mar. Micropaleontol.* 20 (1993) 183–201.
- [31] B.K. Sen Gupta, T.J. Temples, M.D.G. Dallmeyer, Stratigraphic trends of Late Quaternary benthic foraminifera in the eastern Caribbean Sea: Abstracts with Programs, *Geol. Soc. Am.* 13 (7) (1981) 551.
- [32] F. Sgarrella, M. Moncharmont Zei, Benthic foraminifera of the Gulf of Naples, Italy: systematics and autecology, *Boll. Soc. Paleontol. Ital.* 32 (1993) 145–264.
- [33] P.B. Smith, Ecology of benthonic species, *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 429 (B 1) (1964) 1–55.
- [34] V. Simonelli, Appunti sopra i terreni neogenici e quaternari dell' isola di Candia, *Atti R. Accad. Lincei, Roma, Ser. 5, Rend., Cl. Sci. fis. mat. natur.* 3 (1894) 265–268.
- [35] M.V. Triantaphyllou, N. Tsaparas, M. Stamatakis, M.D. Dermizakis, Calcareous nannofossil biostratigraphy and petrological analysis of the pre-evaporitic diatomaceous sediments from Gavdos Island, southern Greece, *N. Jahrb. Geol. Paläontol. Monatsh.* (3) (1999) 161–178.