



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Palevol 4 (2005) 191–201



<http://france.elsevier.com/direct/PALEVO/>

Paléontologie générale (Paléoécologie)

Enregistrement par les diatomées des variations paléoenvironnementales durant le Sarmatien dans l'aire paratéthysienne (Roumanie)

Simona Saint Martin ^a, Jean-Paul Saint Martin ^{b,*}

^a *Laboratoire de paléontologie, université de Bucarest, 1, bd Balcescu, Bucarest, Roumanie*

^b *UMR 5143, Paléobiodiversité et paléoenvironnements, Département « Histoire de la Terre », Muséum national d'histoire naturelle, 8, rue Buffon, 75005 Paris, France*

Reçu le 27 juillet 2004 ; accepté le 8 novembre 2004

Disponible sur internet le 22 décembre 2004

Rédigé à l'invitation du Comité éditorial

Résumé

Une étude détaillée des assemblages de diatomées d'âge Sarmatien (Miocène moyen) a été réalisée dans un bassin à forte productivité biologique du domaine paratéthysien en Roumanie, le bassin Zarand. Au total, 240 espèces de diatomées ont été déterminées, ce qui a permis de mettre en évidence des variations successives de paléosalinité et paléobathymétrie. Des influx marins d'influence extra-paratéthysienne sont corrélatifs de l'élévation du niveau de la colonne d'eau, de l'instauration de conditions marines pour de courts intervalles et de l'apport des taxons d'affinité nord-boréale et/ou subtropicale. Après chaque épisode marin, le bassin évolue vers un système d'isolement où se manifestent des influences continentales, attestées par la présence des taxons d'eau douce.

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

The diatom assemblages as environmental evolution recording of the Paratethys area during Sarmatian times. This paper is a detailed study based on Sarmatian (Middle Miocene) diatom assemblages, characterized by high biologic productivity and diversity from the Zarand Basin (Romania). A total of 240 diatom taxa were identified, leading to the conclusion that successive environmental variations such as changes in palaeosalinity and palaeobathymetry had taken place during this period. Water-level increases are correlated with marine influx based on the presence of boreal or subtropical marine taxa. Each marine-dominated episode is followed by one of continental influence: an isolated system where freshwater taxa are a common occurrence. **To cite this article:** *S. Saint Martin, C. R. Palevol 4 (2005).*

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : Diatomées ; Paléoenvironnements ; Sarmatien ; Paratéthys ; Roumanie

Keywords: Diatoms; Palaeoenvironments; Sarmatian; Paratethys; Romania

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : simsaintmartin@yahoo.fr (S. Saint Martin), jpsmart@mnhn.fr (J.-P. Saint Martin).

Abridged English version

1. Introduction

The Miocene deposits of Romania (Fig. 1A) are part of the Paratethys domain [18], originally marine, that extended over the actual central and eastern Europe and constituted since the Oligocene a northern annexe of the Tethys realm. The development of the Carpathian Mountains during Neogene triggers the Paratethys fragmentation in multiple basins with internal and external complicated connections. Some of these evolved into confined basins and presented a paralic character depending on the water mass communication. This particular palaeogeographic situation led to the definition of specific Miocene stages, which are difficult to correlate with those from Mediterranean area (Fig. 1B). It is generally considered, based on microfauna and mollusc fauna studies, that Sarmatian (Upper Serravallian) basins were isolated from oceanic influences and acquired a brackish character before evolving towards sparse, freshwater lakes beginning with Pannonian (Tortonian). A detailed diatom study of Sarmatian deposits has been realised in order to understand the evolution of multiple environmental parameters and oceanographic conditions. Diatoms are unicellular algae with siliceous skeleton that live in all aquatic environments and therefore constitute an important tool in detecting variations of water salinity, bathymetry, temperatures, pH, and circulation.

The Zarand Basin (Fig. 1A) was selected for this study due to its palaeogeographic position inside the Carpathian arch and the presence of one of the most rich diatom microflora known in the Sarmatian of the Paratethys [14].

2. Geological setting

Relative to Carpathian Mountains on the Romanian territory, three domains are separated (Fig. 1A): Pannonian inside the Carpathian arch (where the Zarand basin is situated), Extracarpatic outside the arch, and Euxinic near the Black Sea. The Zarand Basin is considered as an annexe of the Pannonic embayment. In this basin, the Sarmatian deposits overlay conformably Badenian deposits or onlap older formations. The Carand outcrop represents a reference section of Sarmatian stage in the Paratethys area. The deposits are

constituted of marlstones, diatomitic marlstones, diatomites and tuffs that provided the 130 samples analysed for this study.

3. Material and methods

Ten grams of sediment from each sample were treated with the hydrochloric acid and hydrogen peroxide. A drop of decanted sample was strewn on a coverslip. Slides were mounted using the 'baume of Canada' mountant. Percentages of relative abundance of the identified species were calculated counting at least 400 individuals per sample, according to the Schrader and Gersonde [19] method. These diatom species were then regrouped in different classes according to their ecological requirements. The palaeosalinity reconstruction is based on the 'Venice system' classification [22]: freshwater (0–0.5‰), oligohaline (0.5–5‰), mesohaline (5–18‰), polyhaline (18–30‰), euhaline (30–40‰). Palaeobathymetric conclusions are based on the proportions of planktonic and benthic diatoms. Palaeoclimatic and palaeoceanographic parameters are determined from actual diatom climatic distribution considering diatoms of north-boreal influence, diatoms of subtropical influence, and cosmopolitan diatoms.

These quantitative data were used to build diagrams expressing variations in time of environmental parameters.

4. Results

The diatom microflora from Carand is rich and diverse containing 240 identified species belonging to 69 genera (Table 1). Centric diatoms consist of 54 species belonging to 30 genera. Pennate diatoms are represented by the three groups, Araphids, Monoraphids, and Biraphids, with 186 species for 39 genera. It is to note that this diversity characterizes both the Volhynian and the Bessarabian. Such richness is due to the complexity of palaeoenvironmental conditions during Sarmatian that led to a consistent, strong productivity.

Because the Zarand basin belongs to the Central Paratethys, the Sarmatian is used s.s. according to Suess [20], with its two under-stages: Volhynian, and Bessarabian. The present study proposes the following diatom biozones:

- the *Denticulopsis hustedtii* Zone, and *Surirella striatula* Zone for Volhynian; in the Paratethys domain

Denticulopsis hustedtii is present also in the Vienna Basin [17] and in the Pannonian basin from Hungary [6]; the same species is also used for coeval zonations of north Pacific [8], suggesting probable connections between the Paratethys realm and Indo-Pacific ocean;

- the *Coscinodiscus sarmaticus*–*Coscinodiscus doljensis* Zone for Bessarabian; this zone may be correlated partly with *Coscinodiscus doljensis* zone, proposed by Rehakova [17] for Sarmatian deposits of Moravia and Slovakia and partly with *Coscinodiscus doljensis*–*Anaulux simplex* Zone proposed by Hajos [6] for the Sarmatian of Hungary; *Coscinodiscus doljensis* is also present in Bessarabian deposits of Bulgaria [12].

Diagrams show two major palaeoclimate particularities [1,5,8] (Fig. 1C and D): north-boreal influences marked by the abundance of *Coscinodiscus marginatus* or by the association *Actinocyclus curvatulus*–*Thalassiothrix longissima* and subtropical to tropical influences, underlined by the presence of *Thalassiosira decipiens*, *T. lineata*, and *Stellarima stellaris*.

As far as the palaeobathymetry is concerned, three alternate types of diatom assemblages are determined: (1) assemblages with dominant planktic taxa, suggesting a high level of the water column; (2) assemblages with dominant benthic taxa, suggesting shallow water intervals and (3) mixed assemblages.

The variation of vertical distribution of diatoms reflects clearly the palaeosalinity (Fig. 1C). Eight peaks of marine influence are identified by the significant species *Actinocyclus curvatulus*, *Actinoptychus marylandicus*, *A. splendens*, *Coscinodiscus marginatus*, *C. obscurus*, *Thalassiosira decipiens*, *T. eccentrica*, *T. lineata*, *Thalassionema nitzschioides*, *Thalassiothrix longissima*. Five episodes reflect freshwater environment, with *Cymbella cistula*, *C. turgida*, *Eunotia pectinalis*, *Fragilaria brevistriata*, *Gomphonema olivaceum*, *Navicula arata*, *N. viridula*, *Pinnularia halionata*, *Synedra ulna*. Between these events, the assemblages indicate a broad range of salinity variations.

5. Discussion

Three assemblages of diatoms were recognized showing different palaeogeographic distribution:

- taxa with wide geographic and stratigraphic distribution and with large salinity range. Among these

taxa are significant marine plankton species: *Actinocyclus ehrenbergii*, *Actinoptychus marylandicus*, *A. senarius*, *A. splendens*, *Asteromphalus robustus*, *Actinocyclus curvatulus*, *C. marginatus*, *C. obscurus*, *C. oculus-iridis*, *Stellarima stellaris*, *Thalassiosira decipiens*, *T. eccentrica*, *T. lineata*, *Thalassionema nitzschioides*, *Thalassiothrix longissima*, *Nitzschia fossilis*;

- taxa characteristic to the Sarmatian Paratethys realm; the isolation process of Paratethys determined the occurrence of some endemic species (*Coscinodiscus doljensis*, *C. sarmaticus*, *C. rugulosus*, *C. impressus*) mentioned in Sarmatian deposits of Hungary and Czechoslovakia [6,7], Bulgaria [12,21], and Yugoslavia [9].
- endemic taxa of the Pannonian area: *Zygoceros hungaricus*, *Hemiaulus biharensis*, *Stictodiscus hungaricus*; these taxa were described at Carand and Nermis (basin of Zarand) [14] and their endemic character for the Pannonian area was underlined [6,15].

These different diatom groups reflect a complex palaeogeographic setting, where diverse constitutive entities (basins, embayments, gulfs, straits, channels) were intermittently connected or isolated. This trend is also recorded by other siliceous microfossils assemblages as Silicoflagellates [3].

The summary (Fig. 1D) of principal data concerning environmental parameters points out much essential information regarding the evolution of the Zarand Basin, and more broadly of the Paratethys domain. Regarding the salinity, several sequences more or less complete occur throughout the section, representing a transition from a freshwater extreme to a marine one, already observed in the Zarand Basin [10]. The freshwater intervals correspond to the episodic isolation of the basin. The progressive or sudden establishment of high water levels permits more or less important marine influxes. These sequences may be related to positive sea level changes.

Marine influxes correlate directly with subtropical influences particularly during Lower–Middle Volhynian and with either north boreal or subtropical influences in the Uppermost Volhynian and the Bessarabian. These remarks are significant for understanding the palaeocirculation in Paratethys, allowing to infer the following: (1) Paratethys is not a closed system, but an open one in communication (restricted more or less)

with the open oceanic regime; (2) there is a seesaw play between two climatic influences, the Nordic one and another, oriental to southeastern.

Besides freshwater or marine periods, the basin experienced different salinity conditions recorded by the presence of oligohaline, mesohaline, polyhaline taxa. This fact can indicate the distance of the studied site compared to the marine influx, characterizing so a paralic-type basin. The studies on mollusc assemblages from the neighbouring basin (Borod Basin) having similar features, show clearly the transition from marine taxa near the opening of the basin to freshwater taxa registered at the closed extremity [13]. Shallow water intramountain basins of Paratethys evolved as paralic basins with variations of salinity, gradual distribution of fauna and flora and intermittent connections with marine waters.

Diatoms reveal clearly marine influences that contradict the academic scheme of a Paratethys already isolated and with brackish conditions during Sarmatian time. Meanwhile, existing data from other siliceous microfossils as Radiolarians and Silicoflagellates from Miocene sediments of Romania allow similar conclusion [3]. Studies on Foraminifera [4] support the presence of a marine to hypersaline environment at the same time span. However, recent studies carried out in the Vienna and Styrian Basins [11,16] evidence the marine character of the sedimentation of several Sarmatian levels, and consider “that the generally accepted interpretation of the Sarmatian Sea as a slowly freshening brackish basin has to be rejected.” This study reveals the evolving interdependence between the palaeotopography of depressions, sea level oscillations, connections with the worldwide Ocean, water temperature, and degree of marine penetration into the basins.

6. Conclusion

In the context of the global evolution of the Paratethys realm to endorheic conditions, leading to a system of outspread residual freshwater, the Zarand basin is marked during Sarmatian times by fluctuations of salinity and bathymetry in relation with the connection features. The diatom study provides significant information for the palaeoenvironmental reconstructions. Marine influences during Sarmatian are clearly demonstrated and consequently led to conclusion that Panno-

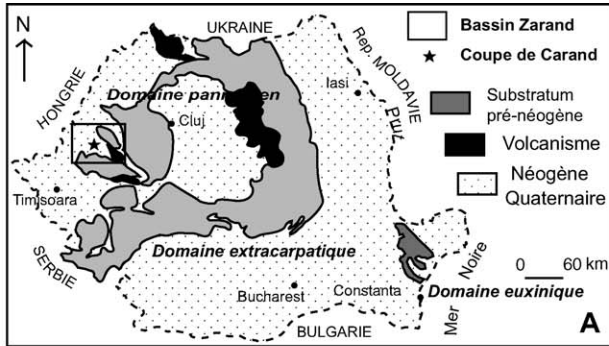
nian area was not being completely isolated. Related to the complex history of different basins of Paratethys, some of them with paralic character, three principal types of diatom assemblages are separated: taxa having wide geographic and stratigraphic distribution, taxa specific for the Sarmatian deposits of Paratethys, and endemic taxa only for the Pannonian area.

1. Introduction

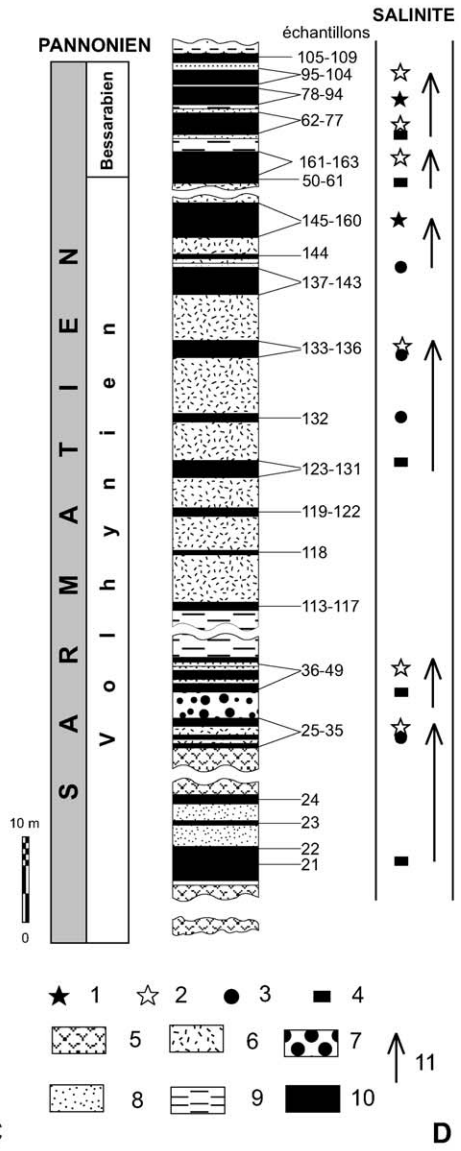
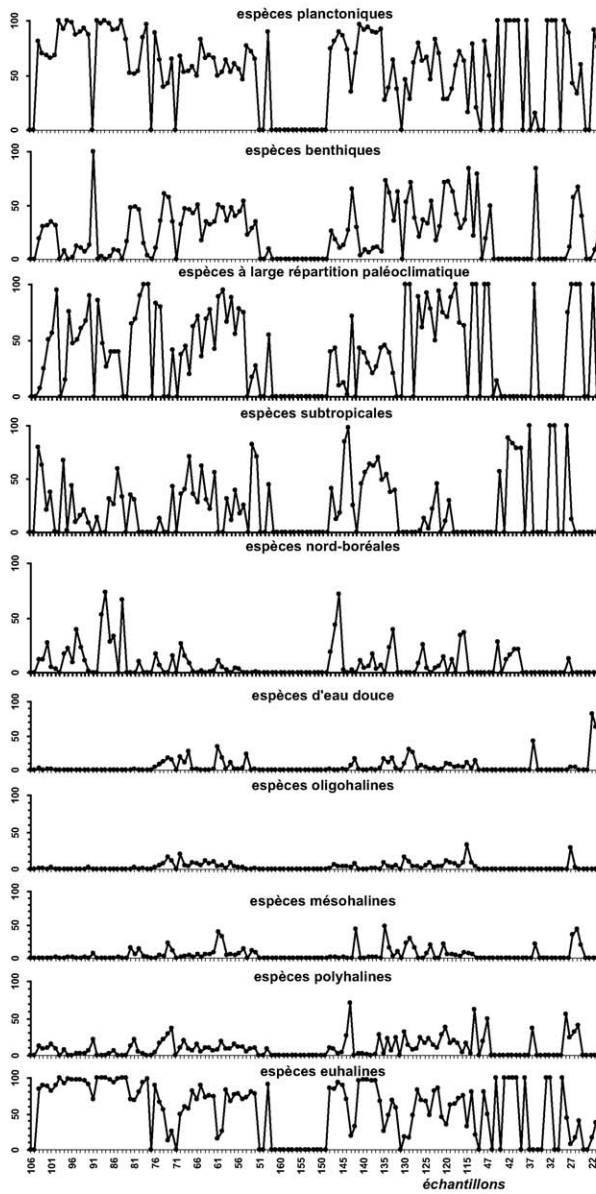
Les dépôts du Miocène de Roumanie (Fig. 1B) s’inscrivent entièrement dans le contexte de la Paratéthys [18], un domaine originellement marin recouvrant une bonne partie de ce qui correspond actuellement géographiquement à l’Europe centrale et l’Europe de l’Est, constituant dès l’Oligocène une annexe septentrionale de la Téthys. La mise en place de l’arc Carpatique contribue, au Néogène, au parcellisation en de multiples bassins aux connexions internes et externes complexes, certains pouvant évoluer vers l’isolement et présenter un caractère paralique en fonction du jeu des communications avec les masses marines. Cette situation paléogéographique particulière a conduit à la définition d’étages spécifiques du Miocène et leur équivalence avec des étages méditerranéens est parfois délicate à établir (Fig. 1B). On considère généralement, notamment sur la base des microfaunes et des faunes de mollusques, qu’à partir du Sarmatien (Serravallien supérieur), l’ensemble des bassins, isolé des influences océaniques, acquiert un caractère saumâtre avant de constituer des étendues éparses d’eau douce au Pannonien (Tortonien).

Les diatomées, algues unicellulaires à frustule siliceux présentes dans tous les milieux aquatiques, sont fréquemment utilisées comme outil paléocéologique pour la reconstitution des paramètres paléoenvironnementaux (salinité, bathymétrie, température des eaux, pH, circulations), surtout au Néogène, la plupart des taxons fossiles recensés à cette époque vivant encore actuellement. Une étude détaillée des diatomées de dépôts sarmatiens a donc été entreprise, afin de comprendre l’évolution des conditions océanographiques dans le domaine de la Paratéthys.

Le bassin intra-montagneux de Zarand (Fig. 1A) a été choisi, en fonction de sa position paléogéographique à l’intérieur de l’arc Carpatique et de la présence de nombreux niveaux de diatomites ayant livré une



Ma	époques	étages	
		Méditerranée	Paratéthis centrale
11	MIOCÈNE MOYEN	Tortonien	Pannonien
12		Serravallien	Sarmatien
13	Langhien		
14			
15			
16			



microflore diatomique de référence [14], une des plus riches connues pour le Sarmatien de la Paratéthys.

2. Cadre géologique de l'étude

Par rapport à la chaîne des Carpates, sur le territoire roumain, on peut distinguer plusieurs domaines (Fig. 1A). À l'intérieur des Carpates se situe le domaine Pannonien. À l'extérieur des Carpates, on distingue le domaine extracarpatique et le domaine euxinique, situé à proximité de la mer Noire. Notre étude porte sur un bassin appartenant au domaine Pannonien : la dépression de Zarand, considérée comme une annexe de la dépression pannonique. Les dépôts sarmatiens y sont en continuité avec ceux de l'étage inférieur, le Badénien, ou sont transgressifs sur les terrains plus anciens.

La coupe de Carand constitue une des coupes de référence pour le Sarmatien de la Paratéthys. Les dépôts, représentant la plus grande partie du Sarmatien, sont constitués de marnes, marnes diatomitiques, diatomites et cinérites. Au total, 130 échantillons ont été prélevés et analysés.

3. Matériel et méthodes

Pour chacun des échantillons prélevés, une quantité d'environ 10 g de sédiment est attaquée à chaud avec l'acide chlorhydrique et du peroxyde d'hydrogène. Après une série de décantations, une goutte de suspension est étalée sur une lame et recouverte par une lamelle. Pour chaque lame étudiée au microscope optique, l'abondance relative (en pourcentage) des espèces identifiées est calculée à partir du comptage sur lame de plus de 400 individus, selon la méthode de Schrader et Gersonde [19]. Selon leurs exigences écologiques, les diatomées sont regroupées en diverses classes. La

reconstitution des conditions de paléosalinité est basée sur la classification *Venice system* [22] : milieux d'eau douce (0–0,5‰), oligohalins (0,5–5‰), mésosalins (5–18‰), polyhalins (18–30‰), euhalins (30–40‰). Les indications paléobathymétriques sont simplement tirées des rapports entre effectifs de diatomées planctoniques et effectifs de diatomées benthiques. Les paramètres paléoclimatiques et paléo-océanographiques sont envisagés à partir des données biogéographiques concernant les diatomées actuelles, en prenant en compte des diatomées d'influence nord-boréale, des diatomées d'influence subtropicale et des diatomées cosmopolites. Les données quantitatives obtenues permettent alors d'établir des graphiques mettant en évidence les variations de ces divers paramètres du milieu.

4. Principaux résultats

4.1. Caractéristiques générales de la microflore de diatomées

La microflore de diatomées de Carand est particulièrement riche, avec 240 espèces regroupées en 69 genres (Tableau 1). Les diatomées centriques sont représentées par 54 espèces, appartenant à 30 genres. Les diatomées pennées sont représentées par 186 espèces, pour 39 genres. Il est à noter que cette richesse caractérise tant le Volhynien que le Bessarabien, traduisant à la fois la complexité et la variabilité des conditions paléoenvironnementales au cours du Sarmatien et la permanence d'une forte productivité.

4.2. Biostratigraphie

Le bassin de Zarand étant partie prenante de la Paratéthys centrale, on utilise le Sarmatien s.s. (de type Pannonien) selon Suess [20], avec deux sous-étages: Volhynien et Bessarabien.

Fig. 1. (A) Situation géographique et géologique et secteur d'étude. (B) Équivalence des étages du Miocène moyen de la Méditerranée et de la Paratéthys. (C) Graphiques en pourcentages des principales catégories écologiques. (D) Colonne lithostratigraphique et principaux événements environnementaux : 1, niveaux dominés par des taxons marins d'influence subtropicale ; 2, niveaux dominés par des taxons marins d'influence nord-boréale ; 3, niveaux dominés par des taxons mésosalins ; 4, niveaux dominés par des taxons d'eau douce ; 5, andésites ; 6, cinérites–tuffites, 7, conglomérats ; 8, sables ; 9, argiles et marnes ; 10, diatomites et marnes diatomitiques ; 11, séquences de salinité.

Fig. 1. (A) Geographical and geological setting. (B) Middle Miocene stages of Mediterranean and Paratethys. (C) Ecologic variations from diatom assemblages. (D) Lithostratigraphic section and main environmental features: 1, levels with dominant marine taxa indicating north-boreal influences; 2, levels with dominant marine taxa indicating subtropical influences; 3, levels with dominant mesohaline taxa; 4, levels with dominant freshwater taxa; 5, andesites; 6, cinerites–tuffas; 7, conglomerates; 8, siliceous sands; 9, clays and marls; 10, diatomites et diatomitic marls; 11, salinity sequences.

Tableau 1

Liste des espèces de diatomées identifiées dans le bassin Zarand au Sarmatien

List of Sarmatian diatom species from the Zarand basin.

DIATOMÉES CENTRIQUES

<i>Actinocyclus curvatulus</i> Janisch	<i>Chaetoceros</i> sp.	<i>Paralia sulcata</i> Ehr. var. <i>radiata</i> Grunow
<i>Actinocyclus ehrenbergii</i> Ralfs	<i>Coscinodiscus curvatulus</i> Grunow	<i>Podosira hungarica</i> Pantocsek
<i>Actinocyclus ehrenbergii</i> var. <i>tenellus</i> (Brebisson) Hustedt	<i>Coscinodiscus doljensis</i> Pantocsek	<i>Podosira pantocsekiana</i> Hajos
<i>Actinoptychus marylandicus</i> Andrews	<i>Coscinodiscus grunowii</i> Pantocsek	<i>Podosira robusta</i> Pantocsek
<i>Actinoptychus senarius</i> Ehrenberg	<i>Coscinodiscus impressus</i> Hajos	<i>Psammodiscus nitidus</i> (Gregory) Round & Mann
<i>Actinoptychus splendens</i> (Schadb.) Ralfs	<i>Coscinodiscus marginatus</i> Ehrenberg	<i>Rhizosolenia</i> sp.
<i>Asterolampra</i> sp.	<i>Coscinodiscus obscurus</i> Schmidt	<i>Stellarima stellaris</i> (Roper) Hasle & Sims
<i>Asteromphalus robustus</i> Castracane	<i>Coscinodiscus oculus-iridis</i> Ehrenberg	<i>Stephanodiscus kanitzii</i> Grunow
<i>Aulacoseira distans</i> (Ehr.) Simonsen	<i>Coscinodiscus rugulosus</i> Hajos	<i>Stephanopyxis turris</i> (Gréville) Ralfs
<i>Aulacoseira granulata</i> Ehrenberg	<i>Coscinodiscus sarmaticus</i> Pantocsek	<i>Stictodiscus hungaricus</i> Pantocsek
<i>Auliscus hauckii</i> Pantocsek	<i>Cyclotella</i> sp.	<i>Stictodiscus kittonianus</i> Gréville
<i>Auricula complexa</i> Gregory	<i>Hemiaulus biharensis</i> Pantocsek	<i>Terpsinoe musica</i> Ehrenberg
<i>Azpeitia vetustissima</i> (Pantocsek) Sims	<i>Hyalodiscus aff. laevis</i> Ehrenberg	<i>Thalassiosira decipiens</i> (Grunow) Joergensen
<i>Bacteriastrum hyalinum</i> Lauder	<i>Hyalodiscus radiatus</i> (O. Meara) Grunow	<i>Thalassiosira eccentrica</i> (Ehr.) Cleve
<i>Biddulphia aurita</i> (Lyngbye) Brebisson	<i>Hyalodiscus scoticus</i> (Kutz.) Grunow	<i>Thalassiosira lineata</i> Jousé
<i>Biddulphia pulchella</i> Gregory	<i>Hydroseira boryana</i> Pantocsek	<i>Triceratium laetum</i> Pantocsek
<i>Biddulphia tuomeyi</i> Bailey	<i>Melosira nummuloides</i> Agardh	<i>Triceratium balearicum</i> Cleve & Grunow
<i>Cerataulus boryanus</i> Pantocsek	<i>Paralia sulcata</i> Ehr. var. <i>coronata</i> (Ehr.) Grunow	<i>Zygoceros hungaricus</i> Pantocsek

DIATOMÉES PENNÉES

<i>Achnanthes baldjickii</i> (Brightwell) Grunow	<i>Diploneis vetulla</i> (A. Schmidt) Cleve	<i>Navicula parallelistriata</i> Pantocsek
<i>Achnanthes brevipes</i> Agardh	<i>Entopyla australis</i> Gréville	<i>Navicula pennata</i> A. Schmidt
<i>Achnanthes brevipes</i> var. <i>subtilissima</i> Ag.	<i>Epithemia turgida</i> (Ehrenberg) Kutzling	<i>Navicula praetexta</i> Ehrenberg
<i>Achnanthes danica</i> (Floggel) Grunow	<i>Eunotia pectinalis</i> (Mull) Rabenhorst	<i>Navicula radiosa</i> Kutzling
<i>Achnanthes hauckiana</i> Grunow	<i>Eunotia polyglyphis</i> Grunow	<i>Navicula salinarum</i> Grunow
<i>Achnanthes lanceolata</i> (Brebisson) Grunow	<i>Fragilaria bituminosa</i> Pant. var. <i>curta</i> Pant.	<i>Navicula styriaca</i> Pantocsek
<i>Amphiprora striata</i> Pantocsek	<i>Fragilaria bituminosa</i> Pant. var. <i>elongata</i> Pant.	<i>Navicula viridula</i> (Kutzling) Ehrenberg
<i>Amphora coffeaeformis</i> (Agardh) Kutzling	<i>Fragilaria brevistriata</i> Grunow	<i>Navicula yarrensensis</i> Grunow
<i>Amphora crassa</i> Gregory	<i>Fragilaria construens</i> (Ehrenberg) Grunow	<i>Nitzschia amphibia</i> Grunow
<i>Amphora crassa</i> Greg. var. <i>punctata</i> Missuna	<i>Fragilaria hirosakiensis</i> Kanaya	<i>Nitzschia antiqua</i> Pantocsek
<i>Amphora holsatica</i> Hustedt	<i>Fragilaria leptostauron</i> (Ehrenberg) Hustedt	<i>Nitzschia commutata</i> Grunow
<i>Amphora intersepta</i> A. Schmidt	<i>Frustulia martonfii</i> Pantocsek	<i>Nitzschia cylindrus</i> Grunow
<i>Amphora juvenalis</i> Pantocsek	<i>Gomphonema affine</i> Kutzling	<i>Nitzschia distans</i> Gregory
<i>Amphora nova caledonica</i> W. Smith	<i>Gomphonema angustatum</i> (Kutzling) Rabenhorst	<i>Nitzschia doljensis</i> Pantocsek
<i>Amphora proteus</i> Gregory	<i>Gomphonema longiceps</i> Ehrenberg	<i>Nitzschia fossilis</i> (Frenguelli) Kanaya
<i>Amphora punctata</i> Andrews	<i>Gomphonema olivaceum</i> (Horn.) Brebisson	<i>Nitzschia frustulum</i> (Kutzling) Grunow
<i>Amphora szontaghii</i> Pantocsek	<i>Grammatophora angulosa</i> Ehrenberg	<i>Nitzschia hungarica</i> Grunow
<i>Amphora terroris</i> Ehrenberg	<i>Grammatophora hungarica</i> Pantocsek	<i>Nitzschia lorenziana</i> Grunow
<i>Anomoeoneis sphaerophora</i> (Ehrenberg) Pfitz	<i>Grammatophora insignis</i> Grunow	<i>Nitzschia panduriformis</i> Gregory
<i>Caloneis boryana</i> Pantocsek	<i>Grammatophora marina</i> (Lyngbye) Kutzling	<i>Nitzschia sigma</i> (Kutzling) W. Smith

(suite page suivante)

Tableau 1
(suite)

<i>Caloneis liber</i> (W. Smith) Cleve	<i>Grammatophora oceanica</i> (Ehrenberg)	<i>Nitzschia tryblionella</i> Hantzsch
<i>Caloneis silicula</i> (Ehrenberg) Cleve	<i>Grammatophora robusta</i> Dippel	<i>Pinnularia borealis</i> Ehrenberg
<i>Campylodiscus clypeus</i> Ehrenberg	<i>Grammatophora stricta</i> Ehr. var. <i>biharensis</i> Pantocsek	<i>Pinnularia gibba</i> Ehrenberg
<i>Campylodiscus kutzingii</i> Harvey & Bail	<i>Grammatophora stricta</i> Ehr. var. <i>fossilis</i> Grunow	<i>Pinnularia halionata</i> Pantocsek
<i>Campylodiscus limbatus</i> Brebisson	<i>Hantzschia amphyoixis</i> (Ehrenberg) Grunow	<i>Pinnularia interrupta</i> W. Smith
<i>Campylodiscus neogradensis</i> Pantocsek	<i>Licmophora dalmatica</i> (Kutzing) Grunow	<i>Pinnularia major</i> (Kutzing) W. Smith
<i>Campylodiscus striolatus</i> Grunow	<i>Mastogloia binotata</i> (Grunow) Cleve	<i>Pinnularia mesolepta</i> (Ehrenberg) W. Smith
<i>Climacosphenia monilifera</i> Ehrenberg	<i>Mastogloia braunii</i> Grunow	<i>Pinnularia microstauron</i> Ehr. var. <i>brebisonii</i> (Kutz) A. Mayer
<i>Cocconeis boryana</i> Pantocsek	<i>Mastogloia castracanei</i> Pantocsek	<i>Pinnularia scytica</i> (Pantocsek) Cleve
<i>Cocconeis distans</i> Gregory	<i>Mastogloia neogena</i> Pantocsek	<i>Pinnularia viridis</i> (Nitzsch) Ehrenberg
<i>Cocconeis grata</i> A. Schmidt	<i>Mastogloia pethoeii</i> Pantocsek	<i>Plagiogramma adriaticum</i> Grunow
<i>Cocconeis grunowii</i> Pantocsek	<i>Mastogloia smithii</i> Thwaites var. <i>lacustris</i> Grunow	<i>Plagiogramma biharensis</i> Pantocsek
<i>Cocconeis neogradensis</i> Pantocsek	<i>Mastogloia spinosa</i> Jurilj	<i>Plagiogramma pulchellum</i> var. <i>pygmaea</i> Greville
<i>Cocconeis nitida</i> Pantocsek	<i>Mastogloia splendida</i> (Gregory) Cleve	<i>Plagiogramma staurophorum</i> (Gregory) Herib.
<i>Cocconeis ornata</i> Gregory	<i>Mastogloia szontaghii</i> Pantocsek	<i>Plagiogramma truani</i> Pantocsek
<i>Cocconeis placentula</i> Ehrenberg	<i>Navicula abrupta</i> (Gregory) Donkin	<i>Pleurosigma</i> sp.
<i>Cocconeis quarnerensis</i> (Grunow) A. Schmidt	<i>Navicula ammophila</i> Grunow	<i>Rhabdonema adriaticum</i> Kutzing
<i>Cocconeis scutellum</i> Ehrenberg	<i>Navicula irregularis</i> Pantocsek	<i>Rhabdonema humuliferum</i> Kitton
<i>Cymatosira biharensis</i> Pantocsek	<i>Navicula arata</i> Grunow	<i>Rhaphoneis amphiceros</i> (Ehrenberg) Ehrenberg
<i>Cymbella affinis</i> Kutzing	<i>Navicula bacillum</i> Ehrenberg	<i>Rhaphoneis boryana</i> Pantocsek
<i>Cymbella cistula</i> Ehrenberg	<i>Navicula bimaculata</i> Pantocsek	<i>Rhaphoneis gemmifera</i> Ehrenberg
<i>Cymbella helvetica</i> Kutzing	<i>Navicula bituminosa</i> Pantocsek	<i>Rhaphoneis nitida</i> (Gregory) Grunow
<i>Cymbella lanceolata</i> Agardh	<i>Navicula cancellata</i> Donkin	<i>Rhaphoneis nitida</i> var. <i>trigona</i> Azpeita
<i>Cymbella leptoceros</i> (Ehrenberg) Kutzing	<i>Navicula cari</i> Ehrenberg	<i>Rhopalodia arcuata</i> Pantocsek
<i>Cymbella turgida</i> Gregory	<i>Navicula cincta</i> (Ehrenberg) Kutzing	<i>Rhopalodia gibberula</i> (Ehrenberg) O. Mull
<i>Cymbella turgidula</i> Grunow	<i>Navicula directa</i> (W. Smith) Ralfs	<i>Rhopalodia gibberula</i> var. <i>protracta</i> Grunow
<i>Denticulopsis hustedtii</i> Kanaya	<i>Navicula distans</i> Gregory	<i>Rhopalodia incisa</i> (Pantocsek) Jurilj
<i>Dimerogramma boryanum</i> Pantocsek	<i>Navicula flaati</i> Pantocsek	<i>Rhopalodia musculus</i> (Kutzing) O. Mull
<i>Dimerogramma marinum</i> (Gregory) Ralfs	<i>Navicula forcipata</i> Greville	<i>Scoliopleura tumida</i> (Brebisson) Rabenhorst
<i>Diploneis bombus</i> Ehrenberg	<i>Navicula gastrum</i> (Ehrenberg) Kutzing	<i>Stauroneis anceps</i> Ehrenberg
<i>Diploneis coffaeiformis</i> (A. Schmidt) Cleve	<i>Navicula halionata</i> Pantocsek var. <i>directa</i> Pant.	<i>Surirella baldjikii</i> Norman
<i>Diploneis crabro</i> Ehrenberg	<i>Navicula halophila</i> (Grunow) Cleve	<i>Surirella biharensis</i> Pantocsek
<i>Diploneis didyma</i> Ehr. var. <i>elesdiana</i> (Pantocsek) Hajos	<i>Navicula hasta</i> Pantocsek	<i>Surirella comis</i> A. Schmidt
<i>Diploneis interrupta</i> (Kutzing) Cleve	<i>Navicula hennedyi</i> W. Smith	<i>Surirella costata</i> Neupauer
<i>Diploneis major</i> Cleve	<i>Navicula humerosa</i> Brebisson	<i>Surirella ovata</i> Kutzing
<i>Diploneis ovalis</i> (Hilse) Cleve	<i>Navicula irrorata</i> Pantocsek	<i>Surirella striatula</i> Turpin
<i>Diploneis sejuncta</i> (A. Schmidt) Jorg.	<i>Navicula lanceolata</i> (Agardh) Kutzing	<i>Synedra crystallina</i> (Agardh) Kutzing
<i>Diploneis sejuncta</i> var. <i>baldjikiana</i> A. Schmidt	<i>Navicula latissima</i> Gregory var. <i>capitata</i> Pant.	<i>Synedra pulchella</i> (Ralfs) Kutzing
<i>Diploneis smithii</i> (Brebisson) Cleve	<i>Navicula lyra</i> Ehrenberg	<i>Synedra ulna</i> (Nitzsch) Ehrenberg
<i>Diploneis suborbicularis</i> (Gregory) Cleve	<i>Navicula lyra</i> Ehr. var. <i>elliptica</i> A. Schmidt	<i>Thalassionema nitzschioides</i> Grunow
<i>Diploneis subovalis</i> Cleve	<i>Navicula menisculus</i> Schumann	<i>Thalassiothrix longissima</i> Grunow
<i>Diploneis vacillans</i> (A. Schmidt) Cleve	<i>Navicula heteroflexa</i> Pantocsek	<i>Trachyneis aspera</i> (Ehrenberg) Cleve

L'échantillonnage très serré a permis de définir des biozones de diatomées pour délimiter les sous-étages du Sarmatien :

- la zone à *Denticulopsis hustedtii* et la zone à *Suriella striatula* pour le Volhynien. Dans le domaine de la Paratéthys, l'espèce *Denticulopsis hustedtii* a été citée dans le bassin de Vienne [17] et en Hongrie [6]. Il est à remarquer que cette même espèce a été utilisée pour les zonations du même âge du Pacifique nord [2], ce qui suggère de probables connexions entre l'aire paratéthysienne et l'Indo-Pacifique ;
- la zone à *Coscinodiscus sarmaticus*–*Coscinodiscus doljensis* pour le Bessarabien. Cette zone peut être corrélée en partie avec la zone à *Coscinodiscus doljensis*, proposée par Rehakova [17] dans les dépôts sarmatiens de Moravie et de Slovaquie, et également avec une partie de la zone à *Coscinodiscus doljensis*–*Anaulus simplex* proposée par Hajos [6] pour le Sarmatien d'Hongrie. L'espèce *Coscinodiscus doljensis* est également citée dans les dépôts d'âge Bessarabien de Bulgarie [12].

4.3. Paléocirculations

L'examen des graphiques montre, sur un fond sans tendances nettement exprimées de taxons à large spectre paléoclimatique, plusieurs moments particuliers (Fig. 1C et D), caractérisés par des taxons significatifs de complexes biogéographiques reconnus [1,5,8]:

- des influences nord-boréales, marquées par l'abondance de *Coscinodiscus marginatus* ou bien de l'association *Actinocyclus curvatulus*–*Thalassiothrix longissima* ;
- des influences subtropicales à tropicales, soulignées par la présence de *Thalassiosira decipiens*, *T. lineata* et *Stellarima stellaris*.

4.4. Paléobathymétrie

L'analyse de détail fait ressortir trois types d'assemblages en alternance (Fig. 1C) :

- assemblages dominés par le plancton représentant les maximums de la colonne d'eau ;
- assemblages dominés par le benthos représentant les intervalles à faible plan d'eau ;
- assemblages mixtes.

4.5. Paléosalinité

Tout au long de la coupe, de nettes variations de paléosalinité peuvent être observées (Fig. 1C et D). Huit

épisodes d'influence marine sont plus clairement identifiés par la présence significative des espèces *Actinocyclus curvatulus*, *Actinoptychus marylandicus*, *A. splendens*, *Coscinodiscus marginatus*, *C. obscurus*, *Thalassiosira decipiens*, *T. eccentrica*, *T. lineata*, *Thalassionema nitzschioides*, *Thalassiothrix longissima*. Cinq épisodes reflètent plutôt l'instauration de régimes d'eau douce, certifiés par les taxons *Cymbella cistula*, *C. turgida*, *Eunotia pectinalis*, *Fragilaria brevis-triata*, *Gomphonema olivaceum*, *Navicula arata*, *N. viridula*, *Pinnularia halionata*, *Synedra ulna*. Entre ces deux pôles se répartissent, dans les autres niveaux, des assemblages de diatomées couvrant un plus large spectre de salinité.

5. Discussion

5.1. Paléobiogéographie

Trois catégories d'assemblages peuvent être reconnues compte tenu de la répartition paléobiogéographique des espèces de diatomées du bassin Zarand :

- des taxons à large distribution géographique et stratigraphique et large spectre écologique. Parmi ces taxons, il est surtout à retenir de nombreuses espèces du plancton marin avec, pour les plus significatives : *Actinocyclus ehrenbergii*, *Actinoptychus marylandicus*, *A. senarius*, *A. splendens*, *Asteromphalus robustus*, *Actinocyclus curvatulus*, *C. marginatus*, *C. obscurus*, *C. oculus-iridis*, *Stellarima stellaris*, *Thalassiosira decipiens*, *T. eccentrica*, *T. lineata*, *Thalassionema nitzschioides*, *Thalassiothrix longissima*, *Nitzschia fossilis* ;
- des taxons spécifiques du Sarmatien de l'aire paratéthysienne. Le processus d'isolement de l'aire paratéthysienne est déterminé par l'apparition d'espèces endémiques comme *Coscinodiscus doljensis*, *C. sarmaticus*, *C. rugulosus*, *C. impressus*. Ces taxons sont mentionnés dans les dépôts sarmatiens de Hongrie et Tchécoslovaquie [6,7], de Bulgarie [12,21], de Yougoslavie [9] ;
- des taxons endémiques pour le seul domaine pannonien : *Zygoceros hungaricus*, *Hemiaulus biharensis*, *Stictodiscus hungaricus*. De répartition encore plus restreinte, ces espèces enregistrent l'évolution propre à chaque domaine de la Paratéthys. Ces taxons ont été décrits à Carand et Nermis (bassin de Zarand)

[14] et leur caractère endémique pour le domaine Pannonien souligné [6,15] ;

Ces différents assemblages de diatomées sont bien représentatifs d'une paléogéographie complexe, où les diverses entités constitutives de l'aire paratéthysienne (bassins, dépressions, golfes, détroits, diverticules) sont en communication intermittente entre elles et vis-à-vis des domaines marins. Cette complexité des assemblages a été également enregistrée par les silicoflagellés [3].

5.2. Évolution du bassin

La synthèse (Fig. 1D) des principales données concernant les paramètres du milieu fait apparaître plusieurs éléments précisant l'évolution du bassin de Zarand et, plus largement, celle de l'aire paratéthysienne.

Eu égard aux conditions de salinité, plusieurs séquences plus ou moins complètes se répètent tout au long de la coupe figurant un gradient allant d'un pôle d'eau douce vers un pôle marin. Des études réalisées sur les diatomites du Sud-Est du bassin de Zarand [10], à partir de 6 m de dépôts, mettent en évidence une même tendance à l'augmentation de salinité avec, vers le sommet, des formes marines associées à des Silicoflagellés et des Ébriédiens. Aux moments d'isolement du bassin et de rupture des communications marines correspond le régime d'eau douce. L'établissement progressif ou brutal des hauts niveaux permet des entrées marines plus ou moins importantes. Les séquences relevées peuvent être alors rapportées à des variations positives du plan d'eau.

Les influx marins ont une correspondance directe avec des influences subtropicales, surtout au cours du Volhynien ou bien des influences nord-boréales et subtropicales à la fin du Volhynien et au Bessarabien. Ces observations prennent toute leur signification au regard du régime des paléocirculations en Paratéthys. Deux faits peuvent s'en déduire : (1) la Paratéthys n'est pas un domaine clos mais, au contraire, ouvert selon plusieurs voies de communication avec l'océan mondial ; (2) il y a un jeu de bascule entre deux influences climatiques, l'une nordique, l'autre orientale à sud-orientale.

En dehors des périodes de régime d'eau douce ou d'influence marine, le bassin est caractérisé par une salinité variable, avec des formes oligohalines, mésohalines et polyhalines. Cela pourrait en fait traduire l'éloi-

gnement du site d'enregistrement par rapport aux apports marins, caractérisant ainsi un bassin à caractère paralique. Les travaux menés sur les mollusques du bassin voisin aux caractéristiques similaires, le bassin Borod, y montrent nettement un gradient des formes marines aux formes d'eau douce, depuis l'ouverture du bassin jusqu'à son extrémité fermée [13]. Les bassins intramontagneux de la Paratéthys, peu profonds, peuvent ainsi avoir évolué comme des bassins paraliques avec des variations de salinité, des gradients de distribution des faunes et des flores et l'intermittence des communications avec les eaux marines.

La réalité des influences marines révélées par les diatomées contredit le schéma classique d'une Paratéthys déjà isolée et saumâtre au Sarmatien. Cependant, les données obtenues à partir d'autres organismes siliceux, comme les radiolaires et les silicoflagellés des sédiments miocènes de Roumanie [3], montrent également des influx marins au cours du Sarmatien. L'étude des microfaunes permettrait [4], de plus, d'envisager la présence d'un milieu marin à hypersalin au cours du Sarmatien. Enfin, des travaux récemment effectués dans le bassin de Vienne et dans le Bassin styrien [11,16] arguent du caractère marin de la sédimentation à plusieurs niveaux au cours du Sarmatien et considèrent comme archaïque l'hypothèse qui considérait que « la mer Sarmatienne était un bassin isolé, avec seulement des caractères saumâtres *versus* d'eau douce ». Il résulte donc de l'analyse des assemblages de diatomées la mise en évidence d'un jeu complexe entre les paramètres suivants : paléotopographie des dépressions, élévations du plan d'eau, connexions avec l'océan mondial, température des eaux, degré de pénétration des eaux marines à l'intérieur des bassins.

6. Conclusion

Dans le contexte d'une évolution globale du domaine paratéthysien vers l'endoréisme, conduisant au Pannonien à un système d'étendues résiduelles d'eau douce, le bassin Zarand est marqué au Sarmatien par des fluctuations de salinité et de bathymétrie, en relation avec le régime des communications. L'étude des diatomées apporte une contribution à la reconstitution des paléoenvironnements à variations multiples. Des influences marines franches ont pu être mises en évidence à plusieurs niveaux du Sarmatien, soulignant ainsi que, pen-

dant le Sarmatien, le domaine Pannonien n'était pas complètement isolé. En relation avec l'histoire complexe des sous-unités de l'aire paratéthysienne, certaines, à caractère paralique bien caractéristique, trois types principaux d'assemblages de diatomées peuvent être distingués: des taxons à large distribution géographique et stratigraphique et large spectre de salinité, des taxons spécifiques du Sarmatien de l'aire paratéthysienne et des taxons endémiques pour le seul domaine pannonien.

Remerciements

Nous tenons à remercier chaleureusement P. Dumitrica, qui a mis à notre disposition sa collection de lames de la coupe de Carand et nous a fait bénéficier de sa grande connaissance des organismes siliceux du Sarmatien de Roumanie. Nous remercions également les relecteurs, C. Cornet et Y. Rincé, pour la pertinence de leurs commentaires.

Références

- [1] J. Barron, Late Miocene–Early Pliocene palaeotemperatures for California from marine diatom evidence, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 14 (1973) 277–291.
- [2] J. Barron, in: Lower Miocene to Quaternary diatom biostratigraphy from leg 57, of northeastern Japan, Deep Sea Drilling Project, Init. Rep. D.S.D.P. LIV, 1980, pp. 641–691.
- [3] P. Dumitrica, Silicoflagelate miocene din Romania, thèse, université de Bucarest, Roumanie, 1974, 208 p., inédit.
- [4] S. Filipescu, M. Popa, F. Wanek, The significance of some Sarmatian faunas from the southwestern part of the Padurea craiului mountains (Romania), *Acta Palaeontol. Rom.* 2 (1999) 163–169.
- [5] N. Foged, Diatoms in Gambia, *Bibliotheca Diatomologica* 12 (1986) 1–153.
- [6] M. Hajos, Stratigraphy of Hungary's Miocene earth deposits, *Geol. Hung. Ser. Palaeontol.* 49 (1986) 1–217.
- [7] M. Hajos, Z. Rehakova, Fossile Diatomeen des Sarmats s.s.; aus Tschechoslowakei und Ungarn, in: A. Papp, et al. (Eds.), *Chronostratigraphie und Neostatotypen*, M5, Sarmatien, 1975, pp. 546–598.
- [8] A.P. Jousé, O.G. Kozlova, V.V. Muhina, Distribution of diatoms in the surface layer of sediment from the Pacific Ocean, in: B.M. Funnel, W.R. Riedel (Eds.), *Micropaleontology of Oceans*, Cambridge University Press, 1971, pp. 263–269.
- [9] A. Jurilj, Dijatomeje sarmatskog mora Okoline Zagreba, *Acta Biol.* 1 (1957) 1–153.
- [10] S. Krestel, Contributii la studiul diatomeelor din sarmatianul de la Minisul de Sus (Reg. Crisana), *Analele Universitatii Bucuresti, Ser. St. Nat.* 9 (1) (1964) 199–206.
- [11] C. Latal, W.E. Piller, M. Harzhauser, Palaeoenvironmental reconstructions by stable isotopes of Middle Miocene gastropods of the Central Paratethy, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 211 (1–2) (2004) 157–169.
- [12] N. Ognjanova-Rumenova, Middle Sarmatian diatom assemblages from the diatomite deposits, V. Lozinca, north-east Bulgaria, *Spec. Publ. Geoinstitute Belgrade* 21 (1997) 37–42.
- [13] I. Papaianopol, M. Marunteanu, R. Olteanu, P. Dumitrica, G. Popescu, M. Iva, et al., Sinteza datelor biostratigrafice ale Neogenului pentru corelarea formatiunilor de interes pentru hidrocarburi (partea a II a: Sarmatian–Romanian), *Rap. IGR*, 1990 60 p., inédit.
- [14] J. Pantocsek, Beitrage zur Kenntnis des fossilen Bacillarien Ungarns (1886–1905): Teil I, (1886, pp. 1–74; Teil II, 1889, pp. 1–123; Teil III, 1905, pp. 1–118.
- [15] S. Pestrea, Diatomee din Sarmatianul Romaniei, thèse, université de Bucarest, 1999, 327 p., inédit.
- [16] W.E. Piller, The Sarmatian, Middle Miocene, Paratethys brackish water turned into fully marine, *Geol. Soc. Am. Abstr.* 35 (6) (2003) 599.
- [17] Z. Rehakova, Marine planktonic diatoms of the Central Paratethys Miocene and their correlation, *Vest. Ustr. Ustavu Geol.* 52 (1977) 147–158.
- [18] F. Rögl, F.F. Steininger, Neogene Paratethys, Mediterranean and Indo-pacific Seaways, in: P. Brechley (Ed.), *Fossils and Climate*, John Wiley & Sons Ltd., 1984, pp. 171–200.
- [19] J. Schrader, R. Gersonde, Diatoms and silicoflagellates, *Utrecht Micropaleontol. Bull.* 17 (1978) 129–176.
- [20] E. Suess, Untersuchungen über den Charakter der osterr. tertiärlagerungen II. Über die Bedeutung der sogennanten ‚brackischen Stufe‘ oder ‚Cerithienschichten‘, *Sitzungsber. Oesterr. Akad. Wiss. Math. Naturwiss.* 54 (1866).
- [21] D. Temniskova-Topalova, Sarmatian diatoms from the western parts of the Eastern Paratethys, Baltchik, north-eastern Bulgaria, *Acta Geol. Acad. Sci. Hung.* 25 (1982) 65–84.
- [22] Venice system, Final resolution of the symposium on the classification of brackish waters, *Arch. Oceanogr. Limnol.* 11 (1959) 243–248.