



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 336 (2004) 931–938



Stratigraphie

Analyse quantitative des faciès carbonatés et cycles T–R de haute fréquence dans le Barrémien du Prébalkan central (Bulgarie)

Viara Minkovska^a, Bernard Peybernès^{a,*}, Pierre Cugny^b, Todor Nikolov^c

^a UMR–CNRS 5573, Stramipal, université Paul-Sabatier, 39, allées Jules-Guesde, 31062 Toulouse cedex 04, France

^b Géologie et Écologie quantitatives, université Paul-Sabatier, 118, route de Narbonne, 31062 Toulouse cedex 04, France

^c Institut géologique, Académie bulgare des sciences, 24, rue Acad. G.-Bonchev, 1113 Sofia, Bulgarie

Reçu le 7 octobre 2003 ; accepté après révision le 12 février 2004

Disponible sur Internet le 18 mai 2004

Présenté par Michel Durand-Delga

Résumé

Dans l'intervalle biostratigraphique zone à Emerici–zone à Barremense, les dépôts barrémiens du Prébalkan central (plate-forme de Lovech–Veliko Tarnovo) s'articulent en plusieurs formations, où alternent faciès terrigènes argilo-gréseux dominants (Fm. Kormjansko, Fm. Bargarène) et faciès carbonatés « urgoniens » dominants (Fm. Krushevo, Fm. Emen). L'analyse qualitative et, surtout, quantitative des faciès, effectuée sur 13 coupes détaillées et un forage, révèle, dans les deux formations carbonatées de Krushevo et d'Emen, la succession d'une quarantaine de cycles T–R de haute fréquence (5^e ordre) correspondant à autant d'à-coups d'origine eustatique, qui contribuent à l'édification progressive de cette plate-forme. Ces cycles d'environ 100 000 ans constituent un précieux outil de corrélation pour la recherche d'hydrocarbures en subsurface. **Pour citer cet article** : V. Minkovska *et al.*, *C. R. Geoscience* 336 (2004).

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

Abstract

Quantitative analysis of carbonate facies and high frequency T–R cycles in the Barremian formations of Central Fore-Balkan (Bulgaria). Within the Emerici zone–Barremense zone biostratigraphic interval, the Barremian deposits of Central Fore-Balkan (Lovech–Veliko Tarnovo shelf) consist of a succession of several formations where alternate terrigenous argillaceous/sandy-dominated facies (Kormjansko Fm., Bargarène Fm.) and carbonate-dominated ('Urgonian') facies (Krushevo Fm., Emen Fm.). The qualitative and, particularly, quantitative facies analysis of the carbonate successions observed along 13 detailed cross-sections and in one drill hole show the stacking of about 40 fifth-order T–R cycles induced by numerous eustatic jerks contributing to the progressive settlement of this shelf. These high-frequency cycles of about 100 000 years must be regarded as valuable correlation tools for the subsurface hydrocarbon research. **To cite this article**: V. Minkovska *et al.*, *C. R. Geoscience* 336 (2004).

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

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : peybernesb@aol.com (B. Peybernès).

Mots-clés : analyse qualitative et quantitative des faciès ; cycles de 5^e ordre ; Barrémien ; Prébalkan ; Bulgarie

Keywords: qualitative and quantitative facies analysis; 5th-order cycles; Barremian; Fore-Balkan; Bulgaria

Abridged English version

1. Introduction

During the Barremian, within the Emerici zone–Barremense zone biostratigraphic interval at least, the future central Fore-Balkan was covered by a shallow-water sea where alternately deposited argillaceous-sandy terrigenous sediments and carbonate ('Urgonian'-type) sediments corresponding to the succession of the formations Kormjansko (terrigenous), Krushevo (Urgonian), Balgarene (terrigenous) and Emen (Urgonian) [2,6]. Urgonian facies are localized [4] on scattered small shoals and larger shelves, such as the Rousse one to the northeast and the Lovech–Veliko Tarnovo one, in the centre of the country, which is particularly herein studied. This shelf suddenly appears instead of a widespread east–west 'Central Terrigenous Basin' covering during Hauterivian the future Fore-Balkan and the southern part of the 'Moesian Platform' developed more to the north. We have studied [5] the corresponding Barremian series, particularly the Rudist-bearing limestones, from 13 detailed cross-sections (Fig. 1b) and the Preobrazenski Manastir drill hole in order to have a precise idea in the dynamic evolution of the V. Tarnovo shelf during Barremian. We have first reconstructed the general lateral-sequence by means of qualitative and quantitative facies analysis then vertically ordered the elementary facies. This study shows a high frequency (fifth order) cyclicity of the deposits, which could later become a valuable correlation tool for the subsurface hydrocarbon research.

2. Quantitative analysis of the carbonate facies

From the shelf/basin boundary to the shoreline (distal/proximal gradient), 10 main facies (F1 to F10) have been characterized by their microfacies, energy and biophase both from a classic qualitative analysis and from a quantitative analysis concerning the layers and the facies descriptors. This last one [1] associates an objective description of the microfacies by the Cor-

respondence Analysis (CA) and automatic classifications of their descriptors by the Diday's dynamic cluster analysis method and their hierarchic classification on a dendrogram. So are visualized the proximities between the samples (spots) and the descriptors. The representation, in the plane of two first factors of CA, shows (Figs. 2a and 2b): (a) groups of samples collected on various cross-sections, which reveal the main palaeoenvironment; (b) four coenotic affinity clusters, A to D, regrouping the palaeontological descriptors frequently associated within the same lithologically comparable samples. Along the lateral sequence reconstructed by means of these quantitative methods have been laterally characterized: (a) at the basin/external-distal shelf boundary, 3 facies (F1 to F3) corresponding to thickening-up limestones that keep still parallel stratifications. Their biophase is almost only restricted to numerous Bryozoans (cluster D). F4, at the top of the slope, is bioclastic and clearly induced by waves; (b) on the external/distal shelf boundary, F5 (with oblique stratification) and F6 correspond to small (but numerous) fore-stepping oolitic bars (F5) and/or some small coral bioconstructions (F6). The cluster C shows the increase of the agglutinated benthonic Foraminifera amount (such as the first Orbitolinids) coexisting with the last Echinoids and Brachiopods and, already, some Dasycladales. The absence of a true barrier reef (cluster B) suggests a morphology of progressive homoclinal ramp; (c) from lagoon to tidal flat (internal/proximal shelf), F7 to F9 are characterized by their low energy. F7 and F8 coincide with the most important peak of the Bulgarian Urgonian biodiversity (cluster A) marked by Rudists, large benthonic Foraminifera and, particularly, lots of Dasycladales. F9, already intertidal, is less poor in microfauna and contains oncolites; (d) in coastal pools, F10 consists of sandy-ferruginous facies containing reworked then autochthonous Charophytes.

Along axis I (Fig. 2b), succeed from left to right samples and descriptors characterizing environments, from more proximal to more distal, on homoclinal ramp. This proximal/distal gradient is confirmed by the succession of the Dunham's classification struc-

tures along the same axis revealing the increase of the energy. Axis II (Fig. 2b) could be interpreted [6] in terms of gradient of progressive settlement of the bioconstructions that never frame a true barrier reef.

3. High-frequency T–R cycles

The vertical distribution and lateral repartition of the facies F1 to F10, sometimes regrouped, within the Krushevo and Emen formation are represented in Fig. 3. The Emen Fm. consists of two successive carbonate members separated by the Magara marly wedge, regarded as a basinal intercalation of the Balgarene Fm., underlined by an Ammonite-bearing maximum flooding surface. The two formations Krushevo and Emen correspond to the stacking of about 40 fifth order T–R cycles deduced from the vertical evolution of the F1 to F10 facies. They consist of a transgressive (T) half-cycle, followed by a regressive (R) half-cycle, which are separated by a transgression peak generally marked by an increase of the biophase. More of these high frequency cycles are complete but often dissymmetric (the half-cycle T is generally more important). Deposited in a duration of 0.08/0.1 Ma, their thickness varies from 2 to 25 m, the thinner cycles being concentrated within the period of maximum flooding (third order) or of maximum lateral spreading of the small oolitic bars. Some cycles that lack from a cross-section to another, are replaced by amalgamated surfaces. The sedimentary bodies [5] corresponding to the most complete cycles can be reconstructed as sigmoid bodies induced by progradation/aggradation/retrogradation processes in the evolution of the herein studied Urgonian shelf.

1. Introduction

Dans l'intervalle biostratigraphique qui s'étend entre le début de la zone à Emerici (Barrémien basal) et la zone à Barremense (partie inférieure du Barrémien supérieur) au moins, le futur Prébalkan central (Figs. 1a et 1b) était occupé, entre les vallées actuelles de l'Ôsam et de la Jantra, par une mer peu profonde où se déposaient, en alternance, faciès terrigènes argilo-gréseux dominants (bien souvent subsidents) et faciès carbonatés, de type urgonien, dominants. Ainsi se succèdent (Fig. 1c) les formations (Fm.) *Kormjansko* (ter-

rigène), *Krushevo* (urgonien), *Balgarene* (terrigenne) et *Emen* (urgonien) [2,6]. À l'échelle de la Bulgarie [3], l'Urgonien se localise sur de petits hauts-fonds dispersés de type « bahamien » et sur des plates-formes plus vastes, telles celle de Roussé au nord-est et celle de Lovech–Veliko Tarnovo au centre du pays, objet du présent travail. Cette dernière plate-forme apparaît brusquement au lieu et place d'une partie du « Grand bassin terrigène central » [3], de direction est–ouest, dont le dépôt-axe occupait, à l'Hauterivien, le futur Prébalkan et la partie méridionale de la « plate-forme moesienne » plus au nord. Nous avons analysé banc par banc [5] la série barrémienne correspondante et, en particulier, ses carbonates, sur treize coupes détaillées (Fig. 1b), échelonnées d'ouest en est, complétées par le forage de Preobrazenski Manastir. Ces coupes sont numérotées (sur le gradient distal/proximal des paléoenvironnements dominants) de 1 à 9 pour la Fm. Krushevo et de 10 à 14 pour la Fm. Emen sus-jacente. En raison des fréquents passages latéraux de faciès d'une coupe (et d'une formation) à l'autre et de la relative pauvreté des marqueurs biostratigraphiques, il était particulièrement difficile de corrélérer les profils entre eux afin d'avoir une idée précise de l'évolution dynamique de la plate-forme de Lovech–V. Tarnovo en cours d'installation pendant le Barrémien. C'est pourquoi nous avons d'abord procédé à une analyse de faciès, notamment quantitative, afin de reconstituer le spectre des paléomilieus les plus significatifs sur le gradient distal/proximal et la séquence-paysage d'ensemble [5], puis ordonné verticalement les faciès élémentaires dans le but de dégager une éventuelle cyclicité des dépôts à plus haute fréquence possible. C'est la mise en évidence de cette cyclicité du 5^e ordre (fréquence d'environ 100 000 ans) qui est proposée ici.

2. Analyse quantitative des faciès carbonatés

De l'articulation plate-forme/bassin jusqu'au littoral (gradient distal/proximal), dix faciès principaux F1 à F10 ont été caractérisés par leurs microfaciès (bio- et lithofaciès), leur niveau d'énergie et leur biophase (autochtone ou remaniée), à partir d'une analyse qualitative classique complétée par une analyse quantitative de données multidimensionnelles portant sur les gisements et les descripteurs du faciès. Cette dernière avait été particulièrement appliquée à l'étude paléo-

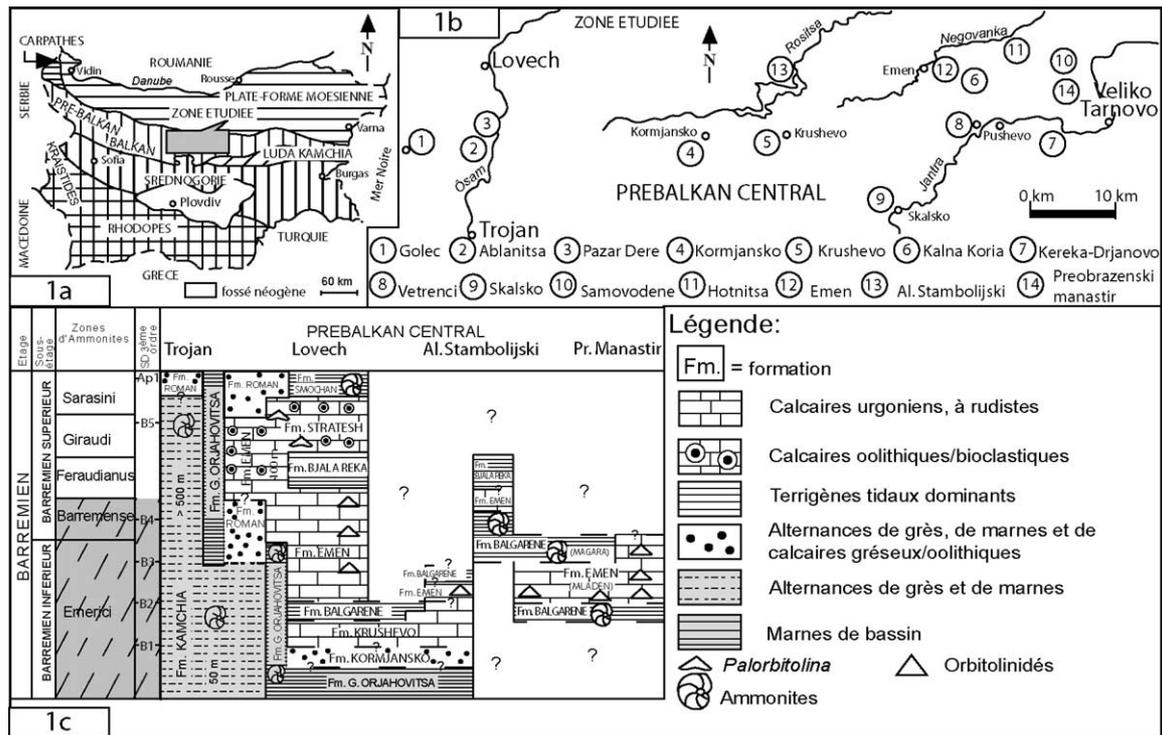


Fig. 1. Le cadre géologique. (a) Localisation de la zone étudiée sur une carte structurale des Balkanides bulgares ; (b) localisation des principales coupes ; (c) tableau stratigraphique du Barrémien du Prébalkan central [4,5].

Fig. 1. The geological frame. (a) Location of the studied area on a structural map of the Bulgarian Balkanides ; (b) location of the main cross-sections ; (c) stratigraphic board of the Barremian deposits in the Central Fore-Balkan [4,5].

écologique des sédiments éocétacées péritéthysiens par l'un de nous [1]. Elle combine une description objective des microfaciès par l'analyse factorielle des correspondances (AFC), et des classifications automatiques de leurs descripteurs par la méthode de nuées dynamique de Diday et une classification hiérarchique sur la base du moment d'ordre 2 traduisant la variance (dendrogramme). On visualise de cette manière les proximités entre prélèvements (points) et descripteurs. La représentation, en projection dans le plan de deux premiers facteurs de l'AFC (facteurs I et II significatifs au seuil de 5 %, facteur III non significatif), fait ainsi apparaître (Figs. 2b et 2c) : (a) d'une part, des groupes de prélèvements effectués sur des coupes distinctes dont les profils sont les plus voisins ; ces groupes matérialisent les principaux paléoenvironnements ; (b) d'autre part, quatre noyaux d'affinité coenotique A à D, nuages de points qui regroupent les descripteurs paléontologiques les plus souvent associés

dans les mêmes prélèvements dont les caractéristiques lithologiques sont les plus proches. L'AFC permettant de réduire le nombre de dimensions dans l'espace de travail et de ne conserver que l'information la plus significative (élimination du bruit de fond), les classifications ont été réalisées à partir des coordonnées des prélèvements et des descripteurs dans l'espace des facteurs retenus en fonction de l'expérience acquise dans cette gamme de faciès [1].

Dans la séquence-paysage reconstituée (Fig. 2a) par ces méthodes, se succèdent latéralement : (a) à l'articulation bassin/plate-forme externe-distale (talus), trois faciès (F1 à F3) qui correspondent à des calcaires stratocroissants, d'énergie de plus en plus forte mais conservant encore leurs stratifications parallèles. Le noyau D (Fig. 2) révèle une forte proportion de bryozoaires et, au contraire, une faible représentation des foraminifères benthiques, limités à quelques taxons ubiquistes. Le faciès F4, positionné à la partie supé-

rieure en talus, correspond à des dépôts bioclastiques induits par l'action des vagues ; (b) sur la bordure externe/distale de la plate-forme, les faciès F5 (où apparaissent les stratifications obliques) et F6 qui se différencient par l'apparition de cordons de dunes oolithiques progradants (F5) et/ou de quelques constructions à madréporaires (F6), toujours de taille limitée. Le noyau C montre l'augmentation, en nombre, des foraminifères benthiques en majorité agglutinants – dont les premiers orbitolinidés (tels que *Dictyoconus balkanicus*, espèce-marqueur du biospace correspondant [6]), *Melathrokerion*, *Everticyclammina*, etc. –, qui coexistent avec des débris de macrofaune (brachiopodes, échinides) et, déjà, quelques dasycladales. L'absence de véritable récif barrière (noyau B) suggère une morphologie en rampe homoclinale faiblement inclinée ; (c) du lagon à l'estran (plate-forme interne/proximale), les faciès F7 à F9, de type lagon, qui sont de plus faible énergie et beaucoup plus étalés dans l'espace. F7 et F8 coïncident avec le plus important pic de biodiversité (noyau A) de l'Urgonien bulgare, marqué par la prolifération des rudistes non constructeurs de récifs (*Toucasia*, *Requienia*, etc.), des grands foraminifères benthiques [orbitolinidés (*D. balkanicus*, *Orbitolinopsis* gr. *cuvillieri-kiliani*, *Palorbitolina lenticularis*), lituolidés (*Charentia*, *Mayncina bulgarica*), miliolidés etc.] et, surtout, des dasycladales très variées (*Suppiluliumaella*, *Salpingoporella*, *Clypeina*, etc.). Le faciès F9, déjà intertidal, se différencie par un appauvrissement de sa microfaune (limitée aux miliolidés) et par la présence quasi-constante d'oncolithes de cyanobactéries ; (d) en milieu marginolittoral (étangs côtiers), F10 qui correspond à des grès et à des calcaires grésio-ferrugineux à proto-oolithes, bioturbations et biophase de charophytes, d'abord resédimentés, puis en place.

En projection suivant l'axe I (Fig. 2b), se succèdent de gauche à droite les prélèvements et les descripteurs caractérisant des environnements échelonnés des plus proximaux vers les plus distaux, sur rampe homoclinale, en passant par des environnements intermédiaires à implantations récifales encore peu marquées. Ce gradient proximal/distal est confirmé, toujours sur l'axe I, par la succession des textures de la classification de Dunham, qui traduit, des *mudstones* aux *grainstones*, l'augmentation de l'énergie hydrodynamique. Matérialisant l'opposition entre les organismes de lagon et les organismes constructeurs, l'axe

II (Fig. 2b) pourrait être interprété [6] en terme de gradient d'instauration progressive des bioconstructions, sans que ces dernières ne charpentent de véritable barre et ne séparent d'une manière franche l'interne de l'externe.

3. Cycles T–R de haute fréquence

Sur la Fig. 3 sont représentées la distribution verticale et la répartition latérale des faciès F1 à F10, parfois regroupés deux à deux, que nous avons répertoriés dans les formations Krushevo (Fig. 3a) et Emen (Fig. 3b). Cette dernière s'articule localement en deux membres carbonatés successifs, séparés par le prisme marneux de Magara considéré comme une indentation latérale, de type bassin, de la Fm. Balgarène (à ammonites du passage Emerici/Barremense) dont le pic faunique souligne une surface d'inondation maximum (mfs) du 3^e ordre. L'ensemble Krushevo–Emen correspond à l'empilement d'une quarantaine de cycles T–R de 5^e ordre (Fig. 3c) déduits de l'évolution verticale des faciès précités. Ils comportent chacun un demi-cycle transgressif (T), constitué de faciès internes/proximaux évoluant vers des faciès externes/distaux rétrogradants (F10 → F1), un pic de transgression (en général, mais pas toujours, marqué par une biophase plus abondante et diversifiée) et un demi-cycle régressif (R) à tendance aggradante/progradante/aggradante (F2 → F10). La plupart de ces cycles eustatiques de haute fréquence sont quasi-complets, bien que souvent dissymétriques. Déposés en 0,08 à 0,1 Ma (durée déduite des zones d'ammonites identifiées et du nombre de cycles dans l'intervalle), leur épaisseur varie entre 2 et 25 m, en fonction des fluctuations de l'espace disponible sur le transect distal/proximal, les cycles les moins épais s'inscrivant dans des périodes d'inondation maximum de 3^e ordre (discrètes, car pas toujours marquées par des condensations d'ammonites et/ou de la glauconie) ou à des maximums d'étalement latéral des dunes hydrauliques oolithiques bordant la plate-forme. Les cycles qui manquent d'une coupe à l'autre sont remplacés par des surfaces amalgamées difficiles à décrypter, car déduites d'une simple inversion de tendance. Lorsque le nombre de coupes voisines permet une reconstitution en 3D [5], les corps sédimentaires, assimilables à des paraséquences, correspon-

Légende: (commune aux Figs. 1c, 2 et 3)

- Faciès F10
- Faciès F9
- Faciès F8 et F7
- Faciès F6 et F5
- Faciès F4, F3 et F5
- Faciès F1 et FB
- stratifications entrecroisées
- fond-durci
- surface d'inondation maximum (mfs)
- probable surface d'érosion
- indice de remaniement
- quartz terrigène
- bioclastes
- oolithes
- oncolithes
- Bacinella/Lithocodium
- Rudistes
- Dasycladales
- Codiacées
- Bivalves
- Brachiopodes
- Echinides
- Crinoïdes
- Bryozoaires
- Madréporaires
- Orbitolinidés
- Lituolidés
- Miliolidés
- Foraminifères circaittoraux
- Charophytes
- Céphalopodes (Ammonites et Nautilies)

Fig. 3. Corrélations entre les coupes étudiées des formations Krushevo (a) et Emen (b); succession des cycles de haute fréquence (c) et modèles de ces cycles.

Fig. 3. Correlations between the studied cross-sections of the Krushevo (a) and Emen (b) formations; succession of the high-frequency cycles (c) and models of these cycles.

dant aux cycles de haute fréquence les plus complets, présentent des formes sigmoïdes témoignant des processus de progradation/aggradation/rétrogradation sur la plate-forme urgonienne étudiée ici.

4. Discussion et conclusion

Il n'existe pas, dans la littérature, de modèles de cyclicité comparables, c'est-à-dire concernant les mêmes paléoenvironnements, donc les mêmes faciès, dans le même créneau stratigraphique. En l'absence des mouvements tectoniques (extensifs) significatifs décelables à l'échelle du 5^e ordre (comme, par exemple des failles normales synsédimentaires), l'empilement des cycles T–R de haute fréquence (à 100 000 ans) dans le Barrémien du Prébalkan central, déduits de l'analyse qualitative et, surtout, quantitative des faciès à dominante carbonatée, traduisent la succession, sur la plate-forme de Lovech–Veliko Tarnovo, d'autant d'écoups dont l'unique origine eustatique est plus que probable. Ceux-ci contrôlent l'installation (Fm. Krushovo), la réduction temporaire [par augmentation de la bathymétrie (prisme de Magara, Fm. Balgarène)], puis la réinstallation (Fm. Emen, membre supérieur) de bioaccumulations urgoniennes à rudistes admettant ponctuellement quelques tentatives d'implantations récifales d'extension limitée. Le rôle de la tectonique devient, en revanche, prépondérant, au 3^e ordre, à l'échelle des séquences de dépôt [3,4]. Intégrés aux modèles 2D et 3D déjà établis [5] et contraints par un cadre biostratigraphique relativement satisfaisant pour ce type de formations, ces cycles d'une durée de l'ordre de 100 000 ans pourraient être induits par les variations de l'excentricité de la terre. Ils devraient en tout cas constituer un référentiel pour le Barrémien des

Balkanides, ainsi qu'un précieux outil de corrélation entre les nombreux forages pétroliers effectués sur la «plate-forme moesienne», qui flanque le Prébalkan, au nord, jusqu'au Danube.

Remerciements

Les auteurs remercient bien vivement R. Bourrouilh et un rapporteur anonyme qui, par leurs remarques constructives, ont permis d'améliorer le texte initial.

Références

- [1] P. Cugny, Modèles paléocéologiques. Analyse quantitative de faciès dans diverses formations crétacées des marges néotéthysiennes et atlantiques. Associations paléontologiques et paléoenvironnements, *Strata*, Toulouse 10 (1988) 1–331.
- [2] K. Khristchev, Lithostratigraphy of the Lovech Urganian Group, *Bull. Geol. Inst., Sofia* 15 (1966) 231–240.
- [3] V. Minkovska, B. Peybernès, T. Nikolov, Palaeogeography and geodynamic evolution of the Balkanides and Moesian 'microplate' (Bulgaria) during the Earliest Cretaceous, *Cretaceous Res.* 23 (2002) 37–48.
- [4] V. Minkovska, B. Peybernès, T. Nikolov, M. Ivanov, Paleogeographic reconstruction of a segment of the North-Tethyan margin in Bulgaria from Barremian to Albian, *Ecol. Geol. Helv.* 95 (2002) 183–195.
- [5] V. Minkovska, B. Peybernès, P. Cugny, T. Nikolov, Évolution dynamique de la plate-forme barrémienne du Prébalkan central (Bulgarie) à partir des cycles de haute fréquence révélés par l'analyse qualitative et quantitative des faciès, *Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse* 138 (2002) 55–67.
- [6] B. Peybernès, M.A. Conrad, P. Cugny, Contribution à l'étude biostratigraphique, micropaléontologique et paléocéologique des calcaires urgoniens du Barrémo-Bédoulien bulgare (Prébalkan et Plate-forme Moésienne), *Rev. Micropaléontol.* 21 (1979) 181–199.