

Géomatériaux (Sédimentologie)

Mise en évidence du gradient de plate-forme « proximal–distal » par analyse factorielle des correspondances : exemple du Turonien inférieur à moyen du Jebel Biréno (Tunisie centrale)

Mohamed Faouzi Zagrarni ^{a,*}, Michel Hennebert ^b, Mohamed Hedi Negra ^c

^a UR « Sédiments, environnements et ressources naturelles », faculté des sciences de Bizerte, université du 7-Novembre de Carthage, 7021 Jarzouna, Bizerte, Tunisie

^b Service de géologie fondamentale et appliquée, faculté polytechnique de Mons, rue de Houdain, 9, B-7000 Mons, Belgique

^c UR « Sédiments, environnements et ressources naturelles », faculté des sciences de Tunis, université de Tunis–El-Manar, 1060 Tunis, Tunisie

Reçu le 2 juin 2005 ; accepté après révision le 29 janvier 2007

Disponible sur Internet le 21 mars 2007

Présenté par Michel Durand-Delga

Résumé

Le traitement par analyse factorielle des correspondances des faciès carbonatés du membre Biréno (Turonien inférieur à moyen) de la coupe du Fej Atroument (Jebel Biréno, Tunisie centrale) nous a permis de reconstituer un modèle d'enchaînement des faciès, qui cadre assez bien avec le modèle « classique » d'une rampe carbonatée. L'axe 1 correspond ainsi à un gradient environnemental montrant la succession de faciès produits par des paléoenvironnements proximaux et distaux. En portant la coordonnée sur l'axe 1 de chaque point échantillon en fonction de la colonne lithostratigraphique, l'histoire sédimentaire s'avère assez complexe. En effet, les positions des points échantillons dans le modèle proposé montrent des pulsations de type proximal–distal ou régressif–transgressif. **Pour citer cet article :** M.F. Zagrarni et al., *C. R. Geoscience 339 (2007)*.

© 2007 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Insight into the proximal–distal platform gradient by means of the correspondence factorial-analysis method: Example of the Lower–Middle Turonian of Jebel Bireno (central Tunisia). The correspondence analysis used in the present study, which consists of a semiquantitative approach, tries to reconstitute a model showing a facies organisation in different parts of a carbonate ramp. As an example, we studied the Lower–Middle Turonian carbonates outcropping in central Tunisia (jebel Bireno). The whole components of the carbonate facies are represented on the axis where the repartition of allochems may express a gradient from the shoreline (negative part of the axis 1) to deeper marine environments (positive part of the axis 1). In the proposed model, the position of the different samples along this axis may express pulsations that are related to proximal–distal or regressive–transgressive evolutions. **To cite this article :** M.F. Zagrarni et al., *C. R. Geoscience 339 (2007)*.

© 2007 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : Turonien inférieur à moyen ; Faciès carbonatés ; Analyse factorielle des correspondances ; Axes factoriels ; Rampe carbonatée ; Tunisie

Keywords : Lower–Middle Turonian; Carbonate facies; Correspondence factorial analysis; Factor axes; Carbonate ramp; Tunisia

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail: zagrarni_m_f@yahoo.fr (M.F. Zagrarni), Hedi.Negra@fst.rnu.tn (M.H. Negra).

Abridged English Version

Introduction

In general, the reconstitution of deposition environments is based on sedimentological studies starting by the analysis of the vertical evolution of facies in a representative section, followed by the establishment of a correlation with other sections in order to point out the evolution of the lateral facies. However, in certain cases, sedimentological facts are not always obvious, as, for example, those in relation with bad outcrops or occurring in subsurface when the study sector is only crossed by one well. In that case, the reconstitution of the environmental model, which will be only based on one section showing vertical facies stacking, has to be very objective. According to the Walther model, in normal deposition conditions, a lateral succession of facies is the expression of their vertical stacking [14,19]. A shallowing upward sequence, for example, is expressing a lateral change from high-energy conditions (on a high) to quiet conditions (in a relatively depressed area). The correspondence analysis, which offers the advantage to use numerous variables and samples, helps to establish an objective interpretation in terms of deposition environment. The studied example concerns carbonate facies, Lower to Middle Turonian in age, and whose well crop out in central Tunisia (Fej Atroument in Jebel Bireno; Fig. 1). This carbonatic series, constituting in Tunisia the 'Bireno Member' [3,6], associates several facies (Fig. 2) of carbonate platform [1,9,12,16–18], starting with fine-grained planktonic facies and vertically changing to coarser facies, locally rich in rudists and expressing shallower conditions [20]. To point out all kinds of vertical facies changes, we have used a semiquantitative method: the correspondence analysis [2,7,8,11], based on allochems counting in each facies.

The correspondence analysis method

The correspondence analysis is one of the eigen-vector methods. It allows the projection of a large multivariate cloud of points into a much reduced space (defined by the factor axes), while conserving the major part of the structured, meaningful information. This method is basically designed to analyse contingency tables (for example, a table showing the abundance of the skeletal and nonskeletal allochems). In fact, the method can handle not only absolute frequencies, but also relative frequencies (percentages) and binary (presence/absence) data. Because the transformations

in correspondence analysis respect the relationships between the rows and columns in the two-way contingency table, the variables and samples play a symmetrical role [7]. This allows a global view of proximities between samples, between variables (allochems, for example) and between samples and variables.

On graphical representations, where two factor axes are taken together, the correspondence analysis provides simultaneous representation of samples and variables (Fig. 3). Thus, the positions of the elements of one set may be used to interpret or explain the distribution of the elements of the other set [10].

Major results

In the Bireno Member, the correspondence analysis method consists of a counting followed by a representation of the components of each carbonate facies. The relative abundance of bioclastic and nonbioclastic allochems (Fig. 4) will provide objective interpretations of palaeoenvironments [4,5,10,13,15].

It means that the repartition of allochems is studied along a gradient from the shoreline to deeper marine environments. Variables (corresponding to allochems or sedimentary structures) suggesting a proximal environment (proximal ramp), such as rudists, algae, are situated among the negative values on axis 1. However, variables, diagnostic of distal environments (distal ramp), such as ammonites, calcispheres, planktonic foraminifera, occupy the positive part of axis 1. Other components, such as peloids, oolites that occupy an intermediate position on axis 1, could express the existence of a subtidal high. In the proposed model, the position of the different sample points on axis 1 (Fig. 5) is expressing pulsations in relation with proximal–distal or regressive–transgressive evolutions.

Conclusions

The correspondence analysis has led us to distinguish four separate facies types within a given carbonate ramp environment (Fig. 6). The main facies types are as follows:

- distal ramp deposits formed of mudstones–wackestones containing planktonic microfauna (foraminifera, calcispheres), ammonites, and echinoderms;
- distal ramp tempestites expressed by packstones fossilising hummocky cross-bedding and rich in bioclasts (molluscan fragments, benthonic foraminifera, and calcispheres);

- subtidal high deposits that consist of grainstones rich in ooliths, red algae, peloids, and rudist fragments;
- sheltered proximal ramp formed of wackestones-packstones rich in rudists, associated with red algae and miliolids.

Overall, in central Tunisia, carbonate facies constituting the Lower–Middle Turonian interval are deposited in a shallow marine environment linked with a carbonate ramp. Lateral changes of shallow marine to pelagic deposits suggest a transitional deepening, without any shelf-break evidence.

1. Introduction

La reconstitution d’un modèle de dépôt de faciès néritique de type plate-forme nécessite, normalement, une étude sédimentologique des paléoenvironnements, basée sur le levé d’une série de coupes (transect) sur toute l’étendue de la plate-forme [1,9,12,16–18]. Cependant, il n’est pas toujours possible que le secteur d’étude offre toutes les informations et données nécessaires, en raison de mauvaises conditions d’affleurement ou de l’existence d’un seul forage

(pétrolier, par exemple) traversant ce secteur. Dans ce cas, la reconstitution d’un modèle de dépôt sera établie à partir des données sédimentologiques d’une seule coupe. Cela peut être envisageable, dans la mesure où, d’après la loi de Walther [19], la même succession verticale des faciès se retrouve latéralement.

L’analyse des correspondances [2,7,8,11] présente l’avantage de donner plus de rigueur à la description de la coupe étudiée, et rend plus fiable l’interprétation des données de terrain ou de forage.

Cette analyse concerne la coupe de Fej Atroument au Jebel Biréno (Tunisie centrale), où affleurent des faciès carbonatés très variés, d’âge Turonien inférieur à moyen (membre Biréno de la formation El Kef [3]).

2. Cadre géographique et géologique

Les dépôts du Crétacé supérieur, qui affleurent largement en Tunisie centrale, sont représentés au Jebel Biréno (Fig. 1) par différentes unités lithostratigraphiques [3,6] principalement carbonatées et marneuses. De bas en haut, nous distinguons les marnes cénomaniennes de la formation Fahdene, les calcaires noirs en plaquettes, les calcaires céno-mano-turonien de la

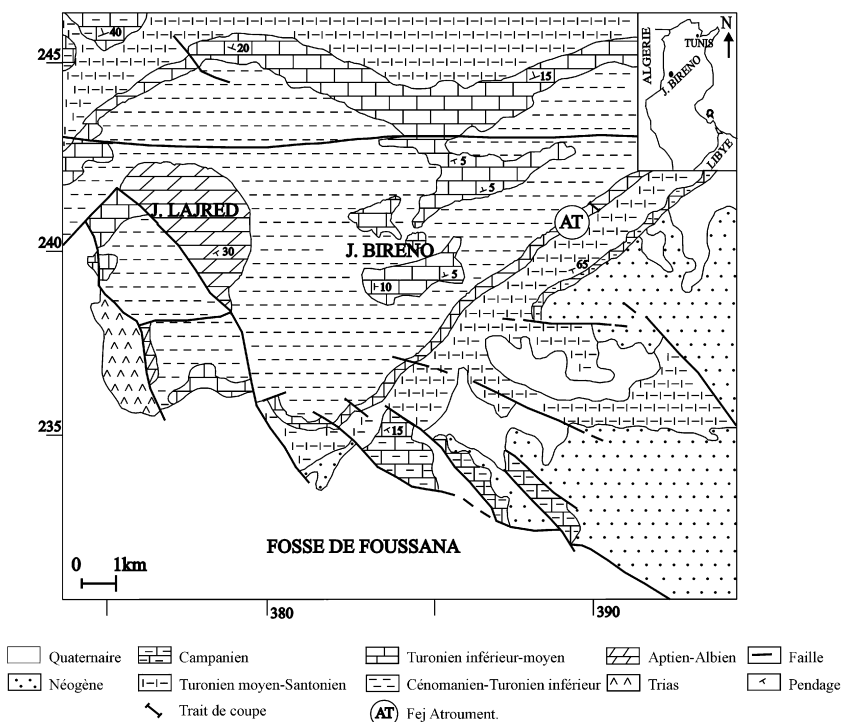


Fig. 1. Localisation et carte géologique du Jebel (Tunisie centrale).

Fig. 1. Location and geological map of Jebel Biréno (central Tunisia).

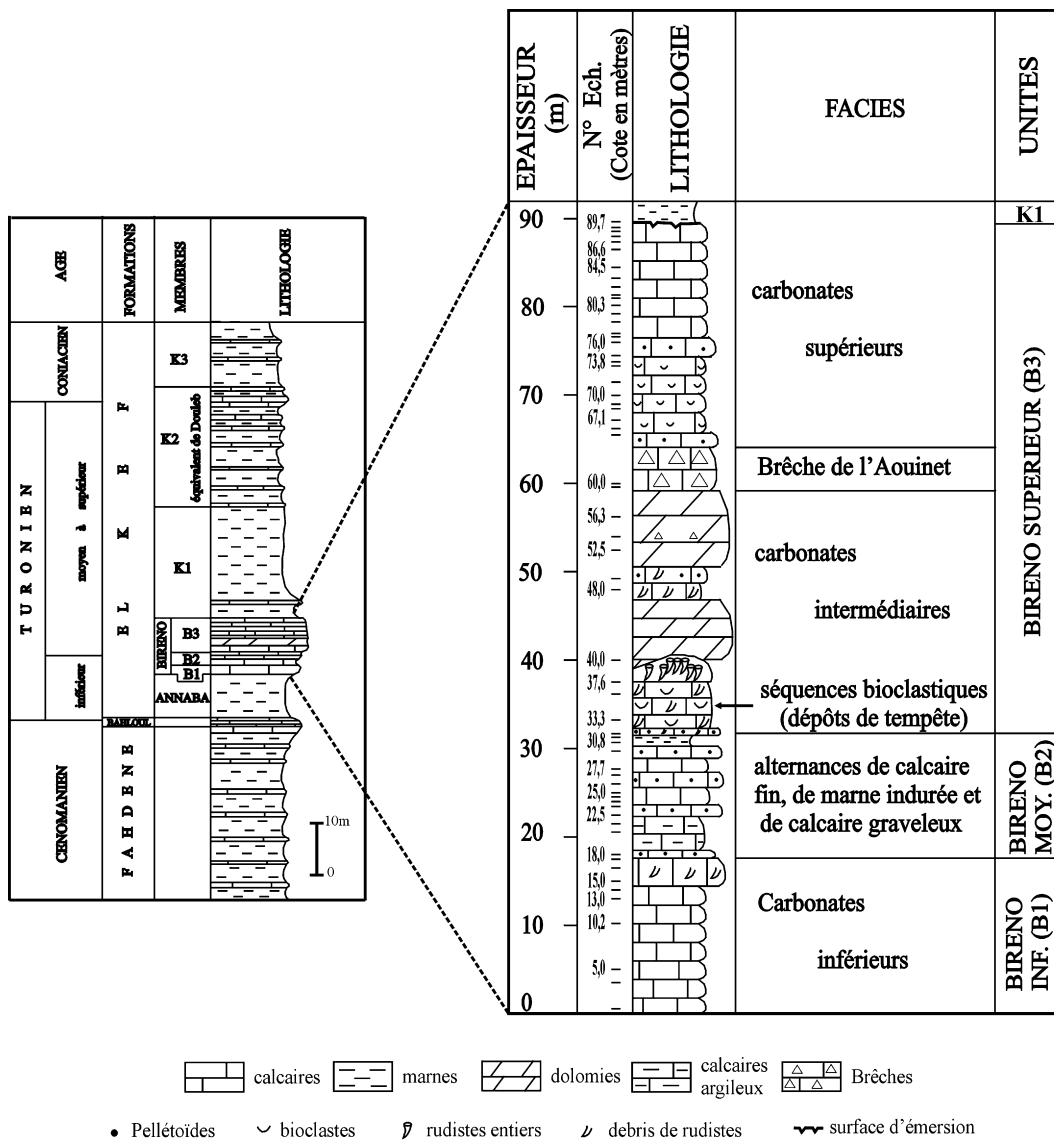


Fig. 2. Lithostratigraphie du Turonien inférieur à moyen de la coupe de Fej Atroument.

Fig. 2. Lower Middle Turonian lithostratigraphy at the Fej Atroument section (Jebel Bireno).

formation Bahloul, les marno-calcaires de la formation El Kef, d'âge Turonien–Santonien, et les carbonates de la formation Abiod, d'âge Campanien. La formation El Kef se subdivise en cinq membres : les marnes du membre Annaba, d'âge Turonien inférieur, les carbonates du membre Biréno, attribués au Turonien inférieur à moyen, le membre marneux K1, d'âge Turonien moyen à supérieur, le membre marno-calcaire K2, attribué au Turonien supérieur–Coniacien basal, et le membre marneux supérieur K3, d'âge Coniacien–Santonien (Fig. 2). La présente étude concerne uniquement les faciès du Turonien inférieur à moyen (membre Biréno) du Jebel Biréno.

3. La coupe de Fej Atroument

Le membre Biréno de la coupe de Fej Atroument (Fig. 1) est subdivisé en trois ensembles lithologiques ([20] ; Fig. 2) :

- un ensemble inférieur B₁, épais de 18 m, qui débute par des calcaires gris, fins, noduleux, admettant des passées centimétriques de marnes indurées ; ces calcaires contiennent essentiellement des calcisphères, des ammonites, des débris d'échinodermes et de rares foraminifères benthiques et planctoniques (hétérohélécidés et hedbergelles, principalement).

- Au-dessus, viennent des calcaires bioclastiques, de couleur beige, à débris de rudistes, algues et rares débris d'échinodermes et de foraminifères benthiques (textularidés, *Rotalia* sp., *Bolivina* sp.) ;
- un ensemble moyen B₂, mesurant 14 m d'épaisseur, représenté par des lentilles métriques plan-convexes de calcaires riches en algues, oolithes, pellétoïdes, lithoclastes et débris de mollusques. Ces calcaires, à stratifications obliques, présentent des intercalations de biomicrocrites à calcisphères abondantes et de marnes indurées riches en ostracodes (*Spinoleberis yotvataensis* ROSENFELD, *Cytherella gambiensis* ROSENFELD) ;
 - un ensemble supérieur B₃, épais de 58 m, qui débute par des calcaires bioclastiques à stratifications obliques en mamelons (*hummocky cross-bedding*), organisés en une succession de séquences de tempête à bases érosives et à granoclassement vertical décroissant des bioclastes. Ces calcaires sont surmontés par une lentille plan-convexe de calcaire bioconstruit, constituée d'abondants rudistes jointifs, tels que *Hippurites primitivus* SIMONPIETRI. Cet édifice est scellé par des calcaires dolomitiques, souvent bioclastiques et vacuolaires. La série sédimentaire se poursuit par des brèches polygéniques à lithoclastes subanguleux, de dimensions variées, enrobés dans une matrice micritique à dolomicritique, à ostracodes. Ces brèches, montrant des figures de *slump*, sont surmontées par des calcaires fins bioclastiques correspondant à des biomicrocrites à foraminifères benthiques (essentiellement des miliolidés) et ostracodes, associées à des calcaires riches en pellétoïdes. L'ensemble B₃ se termine essentiellement par des calcaires fins, à calcisphères abondantes. Dans cette localité (Fej Atroument), le membre Biréno est couronné par une surface d'émersion montrant des cavités de dissolution, partiellement remplies par un sédiment interne.

4. Les données utilisées

La coupe étudiée a été levée dans la partie orientale du flanc méridional de l'anticlinal Biréno (Fig. 1), au niveau de Fej Atroument, qui constitue une cluse naturelle dépourvue de végétation. La succession, complète et continue, montre que le membre Biréno s'intercale entre les marnes du membre Annaba et le membre K1 de la formation El Kef.

L'étude de la série carbonatée du membre Biréno a été entreprise selon des méthodes d'investigation variées, intégrant à la fois des données de terrain et des analyses de laboratoire. Sur le terrain, une première

approche consiste en un levé détaillé, qui tient compte des caractères géométriques (extension, taille et morphologie des corps sédimentaires), sédimentaires (nature des composants, structures, discontinuités et séquences) et faunistiques (microfaunes et macrofaunes). Au laboratoire, des analyses pétrographiques, qui ont porté sur 90 lames minces environ, ont permis une reconnaissance des différents constituants squelettiques et non squelettiques (oolithes, pellétoïdes, lithoclastes...), ainsi qu'une détermination des textures selon la terminologie de Dunham. De plus, une attention particulière a été accordée aux transformations diagénétiques postérieures au dépôt (compaction, cimentation, micritisation, dolomitisation...). En ce qui concerne les roches meubles, des lavages ont porté sur des marnes indurées, ayant pour but essentiel la détermination de la biophase, qui est principalement composée de foraminifères et d'ostracodes. Ces études ont été complétées par une analyse semi-quantitative, qui consiste à déterminer l'abondance des différents éléments figurés. L'ensemble de ces données lithostratigraphiques, sédimentologiques et diagénétiques ont été utilisées pour reconstituer les environnements de dépôt des différents faciès.

5. L'analyse des correspondances

L'analyse des correspondances [2,7,8,11] a déjà été utilisée avec succès dans les études sur la répartition de fossiles ou de grains carbonatés dans les paléoenvironnements sédimentaires [4,5,10,13,15]. Il s'agit d'une méthode d'analyse factorielle qui, comme les autres méthodes de ce type, permet de réduire les dimensions d'un tableau de données (Tableau 1), en extrayant successivement les axes (factoriels), qui représentent la plus grande variabilité des données. Les données – variables (colonnes du tableau) et échantillons (lignes du tableau) – sont projetées sur les axes factoriels. Cela permet de représenter le nuage des points variables et échantillons dans l'espace des deux (ou trois) premiers axes extraits. Cet espace est celui qui contient le maximum d'informations utiles pour appréhender la structure (cachée) des données, en éliminant les variations négligeables ou aléatoires, qui ne nous intéressent pas dans l'analyse. Dans le cas qui nous occupe, le tableau comptait 28 colonnes (descripteurs) et 63 lignes (échantillons). Les données qui y figurent sont semi-quantitatives (0, 1, 2, 3 ou absent, rare, abondant, très abondant) pour les constituants carbonatés et binaires (0, 1 ou absent, présent) pour les structures sédimentaires et les phénomènes diagénétiques. À ces 28 premières colonnes du tableau, il faut

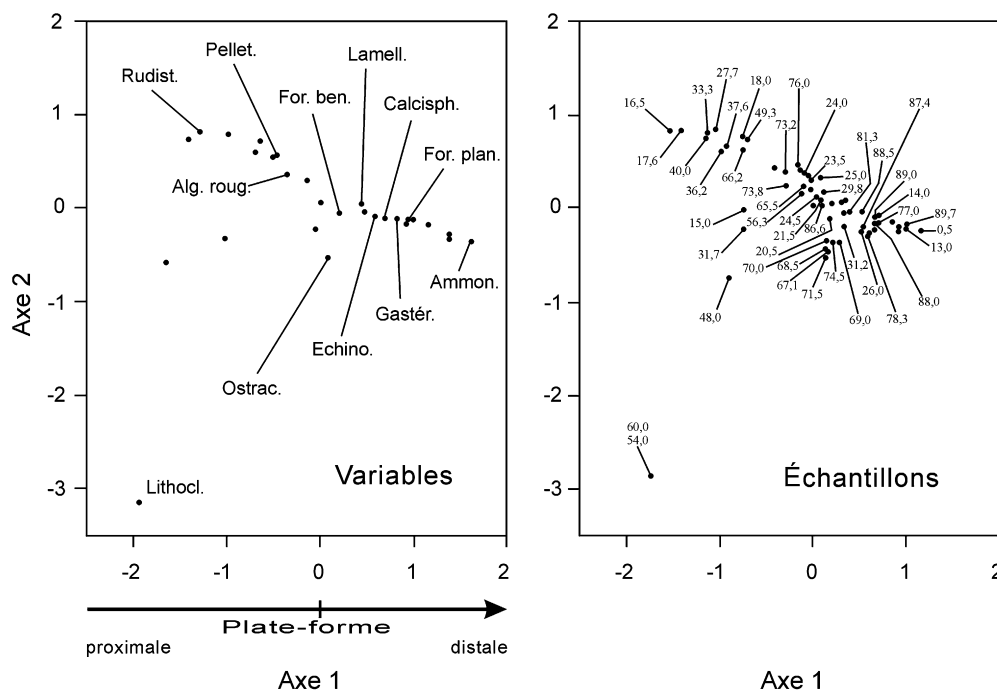


Fig. 3. Représentation des points variables et des points échantillons en fonction des deux premiers axes de l'analyse des correspondances.

Fig. 3. Representation of variable points and sample points in relation with the first two axes of the correspondance analysis.

ajouter la texture de dépôt. Cette dernière est codée : *mudstone* 1, *wackestone* 2, *packstone* 3, *grainstone* 4 et *boundstone* 5. Des textures intermédiaires ont été utilisées pour les mélanges de textures à l'échelle de l'échantillon. Pour des raisons qui seront expliquées plus loin, la texture de dépôt n'a pas été traitée dans l'analyse des correspondances. Dans cette analyse, seul le plan des axes 1 et 2 (qui extraient respectivement 17,6 % et 13,5 % de l'inertie du nuage, significatifs au seuil de 5 %) a été retenu pour l'interprétation des résultats (Fig. 3). L'axe 3, qui correspond à un effet Guttman, ou *arch effect*, par rapport à l'axe 1, est sans signification sédimentologique [2,10,12].

6. Interprétation de la structure révélée par l'AFC

La Fig. 3 montre la répartition des 28 points variables et des 63 points échantillons dans l'espace des deux premiers axes factoriels. Nous pouvons distinguer, aussi bien pour les variables que pour les échantillons, un nuage allongé selon l'axe 1, qui extrait la structure dominante des données, d'où se détachent quelques points en direction des lithoclastes. Comme la séparation nuage–lithoclastes est surtout marquée suivant l'axe 2, nous en déduisons que l'axe 1 a extrait la

structure dominante des données sous la forme d'un alignement des variables et des échantillons le long d'un gradient unique.

Les points variables les plus proches correspondent aux variables les plus liées entre elles et à un type d'environnement sédimentaire ; les points les plus distants représentent les variables les moins compatibles entre elles.

La Fig. 3 ne nous donne que la distribution des centres de gravité des variables (et des échantillons) le long des axes, mais pas la variation effective des variables le long de ces axes. Nous pouvons pallier ce manque en reportant, en fonction de la coordonnée des échantillons sur l'axe choisi, la valeur brute des différentes variables (Fig. 4 ; [10]). Sur la Fig. 4 se matérialise un relais des différents constituants le long de l'axe 1. Un certain nombre de ces constituants sont caractéristiques du milieu du dépôt qui les contient. Les valeurs les plus positives de l'axe sont caractérisées par la fréquence des ammonites, des foraminifères planctoniques et des calcisphères. Dans la partie centrale de l'axe, les éléments figurés représentés consistent, entre autres, en pellicoles, oolithes et foraminifères benthiques. Plus loin, vers les valeurs négatives, les algues et les rudistes sont les allochèmes les plus représentés. Cette distribution correspond bien à ce qui est connu sur

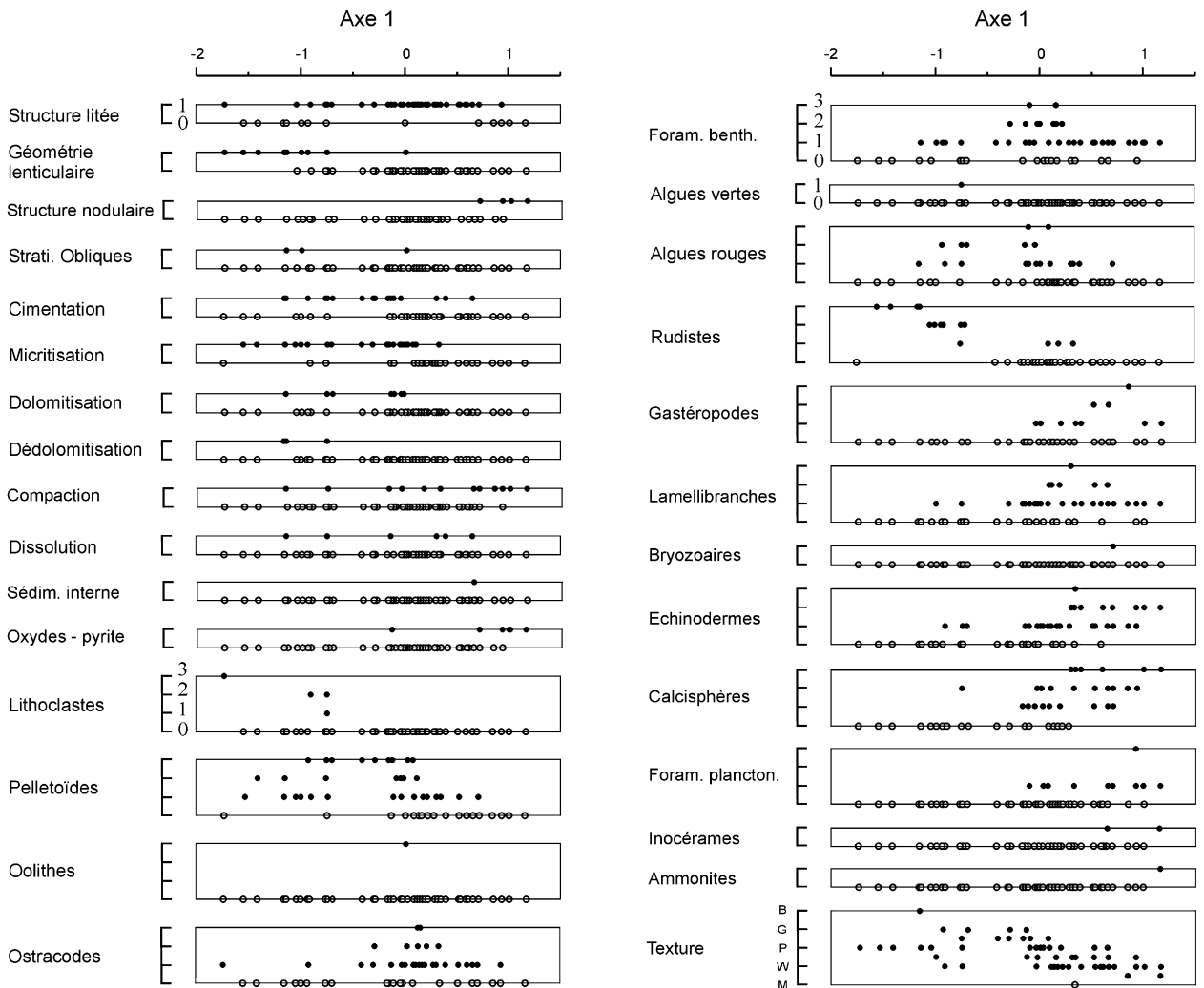


Fig. 4. Valeurs brutes de toutes les variables intervenant dans l'analyse, en fonction de la coordonnée des échantillons sur l'axe 1. On a ajouté la texture des sédiments (qui n'intervient pas dans le calcul).

Fig. 4. Raw values of the variables used in the correspondence analysis, as a function of the samples' coordinates represented on axis 1.

les rampes carbonatées actuelles ou anciennes. La mer ouverte se trouve ainsi à droite, un haut fond subtidal se situe vers le milieu de l'axe, le passage vers la rampe proximale se fait vers la gauche.

Sur la Fig. 4, nous avons ajouté, a posteriori, la texture du sédiment. Ce paramètre, qui n'a pas été traité en même temps que les autres par l'analyse des correspondances, est très utile pour l'interprétation du milieu de dépôt. Nous constatons que, pour les valeurs positives les plus élevées de la coordonnée sur l'axe 1, les textures correspondent à des environnements de faible énergie (*mudstones*–*wackestones* et *wackestones*). En se rapprochant des valeurs négatives, l'énergie augmente (*packstones*–*grainstones* et *grainstones*). Pour les valeurs les plus

négatives, nous retrouvons une énergie plus basse, d'abord assez variable (*wackestones* à *grainstones*), ensuite plus constante (*packstones*). Ce profil de répartition de l'énergie conforte l'hypothèse d'un transect recoupant une rampe carbonatée. L'énergie croît assez régulièrement de la mer ouverte (partie distale de la rampe) jusqu'à un haut fond subtidal, puis diminue à l'arrière de celui-ci (vers la partie proximale de la rampe).

Nous tenons à préciser ici la raison qui nous a incités à ne pas introduire la texture du sédiment dans le traitement par analyse des correspondances. Les environnements les plus proximaux et les plus distaux ont habituellement des niveaux d'énergie assez bas (*mudstone* et *wackestone*), tandis que les environnements les

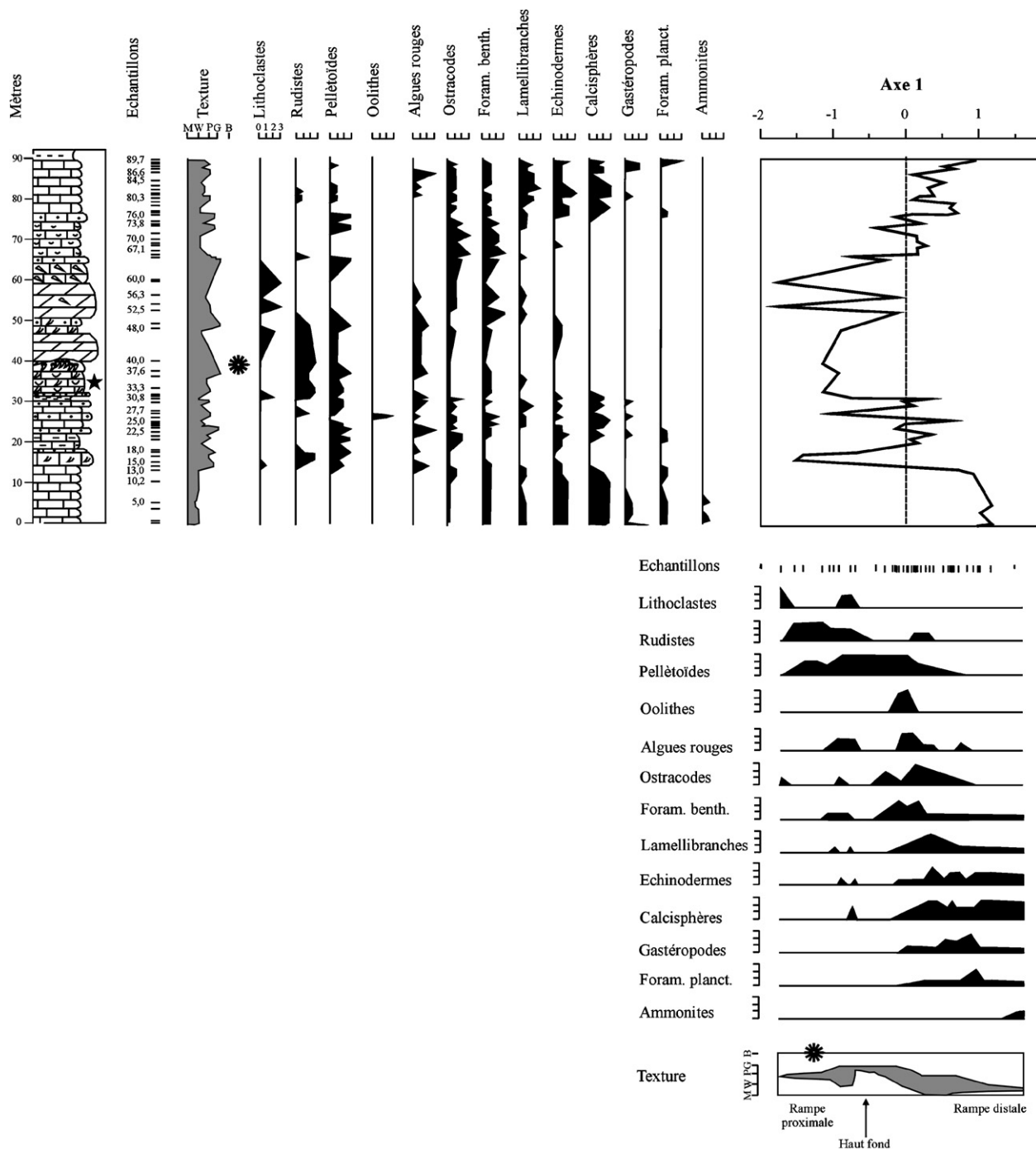


Fig. 5. Distribution des principaux constituants en fonction de la colonne lithostratigraphique (coupe de Fej Atroument) (en haut à gauche). Représentation des variables en fonction de la coordonnée sur l'axe 1 (en bas à droite). Coordonnées des échantillons sur l'axe 1, en fonction de la colonne lithostratigraphique (en haut à droite). *Boundstone à rudistes, *Tempestites.

Fig. 5. Distribution of the main components according to the stratigraphical succession (top left). Representation of the variables as a function of the coordinate on axis 1 (bottom right). Coordinate of sample points as a function of the stratigraphical succession (top right). *Rudist Boundstone, *Tempestites.

plus exposés (du haut fond), situés entre la partie proximale et la partie distale de la rampe (Fig. 5), présentent les niveaux d'énergie les plus élevés (*packstone* et *grainstone*). De cette manière, nous courions le risque de voir sortir de l'analyse un axe 1 « énergie », opposant, d'une part, les environnements calmes proximaux mélangés aux distaux et, d'autre part, les environnements intermédiaires (de haut fond). Le modèle sédimentaire recherché aurait été, en quelque sorte, plié en deux.

La Fig. 5 reprend tout d'abord (en bas et à droite) une synthèse des données majeures de la Fig. 4 ; le relais des constituants est bien visible. Sur la même figure (en haut et à gauche), les données brutes ont été représentées en fonction de la colonne stratigraphique. Comme nous avons présenté les constituants dans l'ordre fourni par l'analyse des correspondances (ordination), nous visualisons très facilement l'évolution verticale générale du système sédimentaire : d'abord régressive, puis transgressive.

Une interprétation verticale plus détaillée peut être obtenue en portant la coordonnée sur l'axe 1 de chaque point échantillon, en fonction de la colonne stratigraphique (Fig. 5, en haut et à droite). Nous observons que l'histoire sédimentaire est assez complexe : la position des points échantillons dans notre « modèle » révèle un certain nombre de pulsations proximal–distal, ou régressifs–transgressifs, qui se superposent à la tendance générale. Cette figure montre une application directe et objective de la loi de Walther de corrélation des faciès : en l'absence de discontinuité importante, l'enchaînement vertical des faciès permet de déduire leur enchaînement horizontal, et vice versa [14,19].

La Fig. 5 présente aussi l'interprétation de la distribution des constituants le long de l'axe 1, sous la forme d'un modèle « classique » de rampe carbonatée. Ce modèle se divise en trois domaines : une rampe proximale, une zone de maximum d'énergie, correspondant dans notre cas à un haut fond, et une rampe distale.

7. Conclusions

L'analyse factorielle des correspondances, comme toute méthode d'analyse factorielle, permet de tenir compte, en même temps, d'un grand nombre de variables et d'échantillons. Elle aide, ainsi, à une interprétation objective des données sédimentologiques disponibles, et donc à une meilleure compréhension du contexte environnemental de dépôt. Le traitement par analyse des correspondances des données du membre Biréno de la coupe de Fej Atroument nous a permis de

reconstituer un modèle d'enchaînement des faciès qui s'effectue d'une manière graduelle en l'absence d'une rupture de pente. Ce mode de transition est typique d'une rampe carbonatée. L'axe 1 correspond ainsi à un gradient environnemental, montrant la succession de faciès produits par des paléoenvironnements proximaux à distaux de la rampe.

Toutefois, il faut bien avouer que cette analyse ne peut donner une vision tridimensionnelle univoque du système sédimentaire étudié. L'analyse des correspondances donne l'axe du gradient environnemental, mais pas le profil topographique de la rampe, qui peut être partiellement déduit des résultats. Par exemple, le haut fond subtidal mis en évidence est déduit de l'association oolithes/pellétoïdes/*grainstone*. L'axe 1 est supposé décrire la direction géographique comprenant les plus fortes variations de faciès, c'est-à-dire la ligne transversale à la rampe. En revanche, il ne nous donne aucune information quant aux variations longitudinales par rapport à cette même rampe.

L'interprétation de la distribution des constituants calcaires et de la variation des textures à travers la série carbonatée de Fej Atroument permet de subdiviser la « plate-forme Biréno » en quatre principaux environnements de dépôt (Fig. 6), correspondant à des contextes sédimentaires distincts, qui sont progressivement relayés dans le temps et probablement dans l'espace. Il s'agit, en effet :

- de dépôts de mer ouverte (rampe distale), caractérisés par des *mudstones* à *wackestones* à microfaune planctonique (foraminifères, calcisphères), ammonites et échinodermes ;
- de dépôts de tempête (rampe distale), caractérisés par des *packstones* à *hummocky cross-bedding*, riches en bioclastes (fragments de mollusques, foraminifères benthiques et calcisphères) ;
- de dépôts de haut fond, représentés par des *grainstones* à oolithes, algues rouges, pellétoïdes et débris de rudistes ;
- de dépôts de rampe proximale abritée, représentés par des *wackestones* à *packstones* riches en débris de rudistes, associés à des algues rouges et à des miliolidés.

Ainsi, l'analyse sédimentologique des séries du Turonien inférieur à moyen du Jebel Biréno débouche sur la reconstitution d'un modèle de rampe carbonatée. L'utilisation de l'analyse factorielle des correspondances, comme méthode d'ordination, a permis un traitement objectif des données, tout en ne se référant pas systématiquement aux modèles classiques de Read.

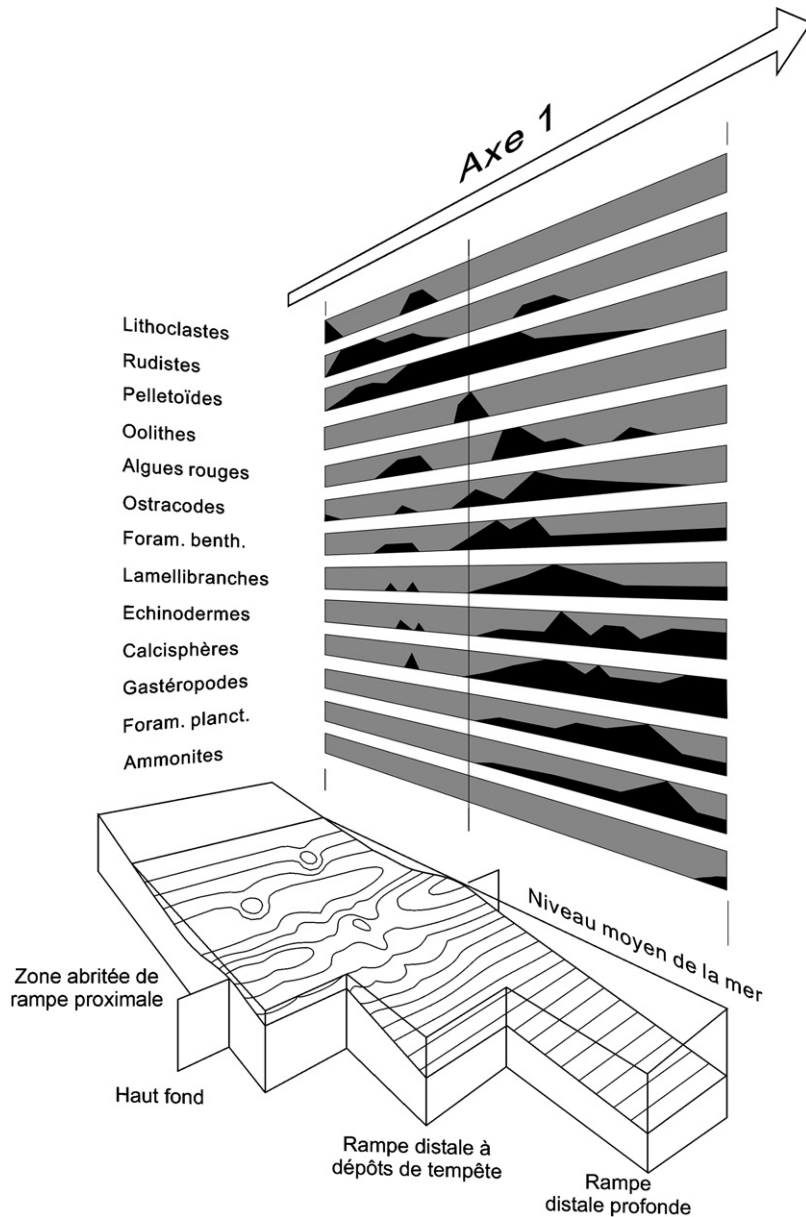


Fig. 6. Interprétation de la distribution des constituants le long de l'axe 1, sous la forme d'un modèle de rampe.

Fig. 6. Modelling of a carbonatic ramp, using the components' distribution on axis 1.

Références

- [1] W.M. Ahr, The carbonate ramp: an alternative to the shelf model, *Trans. Gulf Coast Assoc. Geol. Soc.* 23 (1973) 221–225.
- [2] J.-P. Benzécri, *L'analyse des correspondances*, Dunod, Paris, 1980 (632 p.).
- [3] P.-F. Burolet, Contribution à l'étude stratigraphique de la Tunisie centrale, *Ann. Mines Géol.* 18 (1956) (350 p.).
- [4] P. Cugny, J. Rey, Un exemple d'utilisation de l'analyse factorielle des correspondances en paléocéologie : la répartition des microfossiles dans le Bédoulien d'Estramadure (Portugal), *Bull. Soc. geol. France* 17 (1975) 787–796.
- [5] P. Cugny, J.-M. Mussard, T. Boisseau, B. Peybernès, Analyse factorielle, classifications automatiques et séries chronologiques appliquées à la mise en évidence de gradients paléocéologiques et de cyclicité dans le Berriasien supérieur carbonaté de Chartreuse (zone dauphinoise, France), *C.R. Acad. Sci. Paris, Ser. II* 319 (1994) 1101–1108.
- [6] D. Fourmié, Nomenclature lithostratigraphique des séries du Crétacé supérieur au Tertiaire de Tunisie, *Bull. Centre Rech. Explor. Prod. Elf-Aquitaine, Pau* 2 (1978) 97–148.

- [7] M.J. Greenacre, Theory and applications of correspondence analysis, Academic Press, London, 1984 (364 p.).
- [8] M.J. Greenacre, Correspondence analysis in practice, Academic Press, London, 1993.
- [9] C.R. Handford, R.G. Loucks, Carbonate depositional sequences and systems tracts. Responses of carbonate platforms to relative sea-level changes, in : R.G. Loucks, J.F. Sarg (Eds.), Carbonate sequence stratigraphy – Recent developments and applications, Am. Assoc. Pet. Geol. Mem., Tulsa, Oklahoma, USA 57 (1993) 1–41.
- [10] M. Hennebert, A. Lees, Environmental gradients in carbonate sediments and rocks detected by correspondence analysis: examples from the Recent of Norway and the Dinantian of Southwest England, *Sedimentology* 38 (1991) 623–642.
- [11] L. Lebart, A. Morineau, K.M. Warwick, Multivariate descriptive statistical analysis – Correspondence analysis and related techniques for large matrices, John Wiley & Sons, New York, 1984 (231 p.).
- [12] A. Lees, Les dépôts carbonatés de plate-forme, *Bull. Centre Rech. Pau–SNPA* 7 (1973) 177–192.
- [13] C. Lézin, L. Bonnet, J. Rey, R. Cubaynes, T. Pélissié, Contribution de l'analyse quantitative des faciès aux corrélations stratigraphiques, exemple du Toarcien supérieur–Aalénien dans le Quercy (SW France), *Bull. Soc. geol. France* 171 (1) (2000) 91–102.
- [14] G.V. Middleton, Johannes Walther's law of the correlation of faciès, *Geol. Soc. Am. Bull.* 84 (1973) 979–988.
- [15] J.-M. Mussard, P. Cugny, B. Peybernès, Caractérisation de séquences tectono-eustatiques de différents ordres dans l'Albien du Congo par l'analyse paléocéologique quantitative des associations micropaléontologiques, *Bull. Soc. geol. France* 166 (4) (1995) 389–396.
- [16] J.F. Read, Carbonate platforms of passive (extensional) continental margins: types, characteristics and evolution, *Tectonophysics* 81 (1982) 195–212.
- [17] J.F. Read, Carbonate platform facies models, *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 69 (1985) 1–21.
- [18] P.A. Scholle, D.G. Bebout, C.H. Moore, Carbonate depositional environments, *Am. Assoc. Pet. Geol. Mem.*, Tulsa, Oklahoma, USA 33 (1983) (708 p.).
- [19] J. Walther, *Einleitung in die Geologie als Historische Wissenschaft*, Fischer Verlag, Iéna, Allemagne, 1893–1894 (3 vols.).
- [20] M.F. Zagrarni, *Sédimentologie, stratigraphie séquentielle et diagenèse des faciès du Crétacé supérieur du Djebel Biréno. Paléogéographies des plates-formes carbonatées du Cénomanién supérieur–Coniacien en Tunisie centrale*, thèse, faculté des sciences de Tunis, 1999 (358 p.).