



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 336 (2004) 1355–1362



<http://france.elsevier.com/direct/CRAS2A/>

Géomatériaux (Sédimentologie)

## Impact de la vie benthique sur la genèse de nodules calcaires dans les *black shales*

Jean-Gabriel Bréhéret<sup>a,\*</sup>, Micheline Hanzo<sup>b</sup>, Abderrazzak El Albani<sup>c</sup>, Agnès Iatzoura<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire GÉEAC, UPRES EA 2100, faculté des sciences et techniques, université François-Rabelais, parc Grandmont, 37200 Tours, France

<sup>b</sup> Laboratoire UMR G2R 7566, université Henri-Poincaré, Nancy-1, BP 239, 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy cedex, France

<sup>c</sup> Laboratoire UMR 6532 CNRS HYDR'ASA, université de Poitiers, bât. Sciences naturelles, 40, av. du Recteur-Pineau, 86022 Poitiers cedex, France

<sup>d</sup> Département de géologie sédimentaire, université Pierre-et-Marie-Curie, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France

Reçu le 20 avril 2004 ; accepté après révision le 28 juillet 2004

Disponible sur Internet le 28 octobre 2004

Présenté par Jean Dercourt

---

### Résumé

L'étude de nodules calcaires de quatre séries de *black shales* riches en matière organique permet d'envisager le rôle important joué par l'activité d'organismes benthiques dans la création d'hétérogénéités du sédiment, favorisant ainsi la diagenèse précoce induite par la dégradation microbienne de la matière organique. **Pour citer cet article : J.-G. Bréhéret et al., C. R. Geoscience 336 (2004).**

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

### Abstract

**Impact of benthic life on the genesis of calcareous nodules in black shale facies.** The study of calcareous nodules from four organic-rich black shale series allows us to suggest a prominent part for benthic organisms in creating heterogeneities in the sediment, thus favouring microbially mediated early diagenesis based on organic matter consumption. **To cite this article: J.-G. Bréhéret et al., C. R. Geoscience 336 (2004).**

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

*Mots-clés :* nodules calcaires ; *black shales* ; diagenèse précoce ; vie benthique ; *pellets* ; ammonites ; matière organique

*Keywords:* calcareous nodules; black shales; early diagenesis; benthic life; pellets; ammonites; organic matter

---

\* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : [breheret@univ-tours.fr](mailto:breheret@univ-tours.fr) (J.-G. Bréhéret), [micheline.hanzo@g2r.uhp-nancy.fr](mailto:micheline.hanzo@g2r.uhp-nancy.fr) (M. Hanzo), [abder.albani@univ-poitiers.fr](mailto:abder.albani@univ-poitiers.fr) (A. El Albani).

## Abridged English version

### 1. Introduction

Calcareous nodules in laminated organic-rich sediments are known to be generated by early diagenesis at a small depth below sediment surface by carbonate precipitation, as a consequence of microbial degradation of organic matter in the sulphate-reduction zone (shown by negative  $\delta^{13}\text{C}$  values of carbonates), under the condition of a reduced accumulation rate (see, for instance, [3,11,12]). Our data given hereafter agree with this model, but we address here the question of the sites of nodulization. In this respect, we examine the petrography of nodules from four series of source rocks from different geographical and stratigraphical contexts: Toarcian 'Schistes carton' (Paris Basin, France), Lower Albian 'Niveau Paquier' 'Marnes bleues' (Vocontian Basin, France), Cenomanian–Turonian Querecual Formation (Venezuela), and Lower Turonian of the Tarfaya Basin (Morocco).

### 2. Observations (Figs. 1–5)

In the different outcrops, the nodules are distributed as discontinuous layers parallel to the bedding. Their carbonate content (low-Mg calcite) varies between 75 and 90%. These concretions display a characteristic lamination, which is in continuity with that of the enclosing black shales. This lamination pinches out as a consequence of compaction. In certain instances, the microfacies is a microsparite but, most frequently, it is a pelbiomicrosparite (according to their specificity, beside pellets, bioclasts may be composed of planktonic foraminifera, radiolaria, nannofossils, sponge spicules, ostracoda, bone fragments. . .). The isotopic ratio of carbon is rather light, being comprised between  $-13.2$  and  $-22.5\%$  PDB.

Several characteristics must be emphasized.

The nodules from the 'Schistes carton' [8,9] display frequent young ammonites and numerous aggregates. In the 'Niveau Paquier' [1,2], three occurrences may be presented. (1) The nodules from Les Oustaus (of large size) present hummocky structures, which suggest storm deposits; they are almost devoid of bioclasts. (2) Crown-like concretions from Tartonne are vertically piled and organized around vertical burrows;

they are also devoid of bioclasts. (3) Numerous nodules from Les Coignets are also centred on burrows, but other are not linked with any bioturbation. Bioclasts are numerous, mainly planktonic foraminifera, radiolaria, but also young ammonites; detrital grains are frequent. Nodules from the Querecual Formation [10] are diversified. Bioclasts are generally abundant, and the presence of young ammonites in some instances must be stressed as that of abundant pellets and microcoprolites (g. *Palaxius*). The nodules from Tarfaya [5,6] are rather characterized by the abundance of *Pithonella* besides planktonic and benthic foraminifera, but also by bivalves, brachiopoda and ammonites.

### 3. Interpretation

The four examples come from organic-rich black shales deposited under recurrent anoxic conditions [1, 2,5,6,8,10]. The different composition of laminae results from variations in physicochemical characteristics of the water column.

Practically all nodules are centred on sedimentary heterogeneities. Such a correlation is so general that it would hardly be fortuitous. These heterogeneities could be purely mechanical (hummockies) or biogenic (burrows, pellets) and result from very early sediment reworking (syn- or post-deposition). Thus they must induce a rather high porosity in early stages of burying. Such a high porosity induced by accumulation of pellets and microcoprolites would be favourable to diagenetic precipitations, as for calcite.

In some concretions, young ammonites may be present among abundant faecal pellets or microcoprolites. Such an association allows us to propose the hypothesis that the faecal pellets could be catabolic products of these molluscs. This supposes that these ammonites might live on organic matter either produced in surface water by phytoplanktonic organisms and sedimented, or produced on the sedimentary surface by microbial/algal mats. So, nodules may have preserved ammonite clutches. This requires a sufficient level of oxygenation to allow the activity of these organisms, even if we suppose that the ammonites have succumbed to an early death, as a consequence of anoxia.

Furthermore, these cases illustrate the variety in the conditions of oxygenation in bottom waters at different time scales (e.g., seasons, years).

## 1. Introduction

De nombreux travaux (dont [3,11,12]), portant sur la genèse des nodules calcaires dans les couches laminées riches en matière organique, ont montré que (1) la nodulisation s'opère précocement dans les quelques décimètres sous l'interface eau-sédiment, (2) la précipitation de carbonates représente une conséquence de la dégradation de la matière organique en milieu sédimentaire anoxique, dans la zone de réduction des sulfates (ce que montrent les valeurs négatives du  $\delta^{13}\text{C}$  des carbonates), (3) le concrétionnement s'effectue lors des périodes de faible taux d'accumulation sédimentaire.

Nos données sédimentologiques, pétrographiques et géochimiques étant en accord avec cette interprétation, notre interrogation porte plus spécifiquement sur la localisation des sites de nodulisation. Pour cela, nous nous appuyons sur les analyses pétrographiques de quelques exemples de nodules récoltés dans quatre séries de contextes géographiques et stratigraphiques différents, mais comparables quant à leur richesse en matière organique (qualité de roches mères reconnue). Il s'agit (1) des argilites calcaires toarciennes des Schistes carton (zones à *Tenuicostatum* et à *Serpentinus*) du bassin de Paris (Dudelange, Luxembourg), (2) des marnes de l'Albien inférieur, dans le niveau Paquier, couche-repère du Bassin vocontien (SE France), en trois sites différents – Les Oustaus (Barcillonnette), les Faïsses (Tartonne), Les Coignets (Salignac) –, (3) des marnes du Cénomanién–Turonien de la formation Querecual (Venezuela) et (4) des marnes du Turonien inférieur du bassin de Tarfaya (Maroc).

## 2. Observations

### 2.1. Les nodules des Schistes carton [8,9] (Figs. 1, 5)

Ils sont répartis selon un niveau parallèle à la stratification, sur 50 cm d'épaisseur (conditions d'affleurement limitées). De forme généralement ovoïde, mais

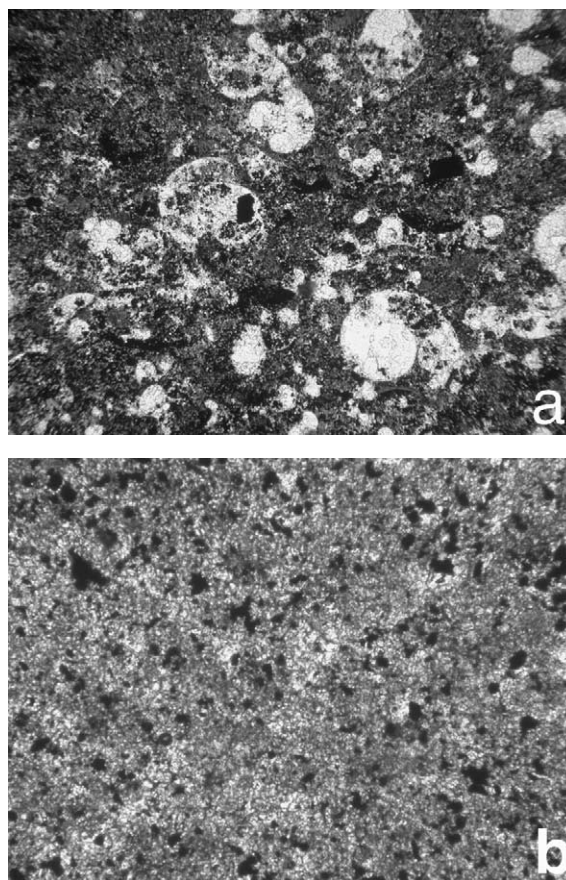


Fig. 1. (a) Nodule des Schistes carton (Toarcien). Wackestone à ammonites juvéniles et ostracodes, de taille inférieure au millimètre. (b) Pelbiomicrosparite avec agrégats (disposition laminée). Largeur du cliché : environ 3,5 mm.

Fig. 1. (a) Nodule from 'Schistes carton' (Toarcian). Wackestone with juvenile ammonites and ostracoda, of size lower than the millimetre. (b) Pelbiomicrosparite with aggregates disposed in laminae. Width of the picture: ca. 3.5 mm.

parfois rognonneuse, leur taille varie de quelques centimètres à quelques décimètres. Ces nodules (75–80%  $\text{CaCO}_3$ ) présentent souvent une structure laminée en continuité avec celle, déformée et compactée, des argilites encaissantes. Au microscope, les lamines se distinguent par deux termes alternants, l'un de texture wackestone à packstone, l'autre de texture mudstone; elles sont soulignées par de petits éléments figurés, tels des ostracodes, des débris osseux (écailles, vertèbres, dents) et des ammonites juvéniles inframillimétriques (rares ammonites adultes et rares fragments végétaux, foraminifères absents). Un examen plus dé-

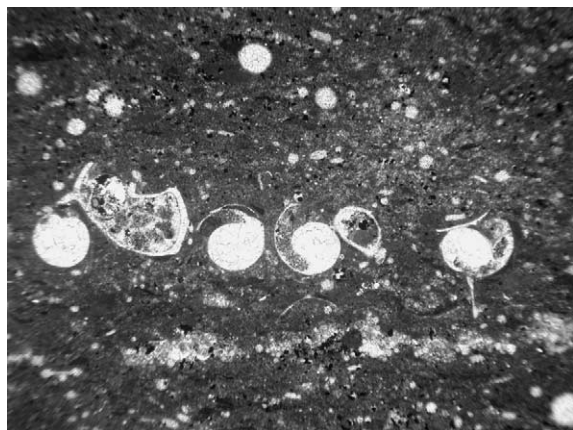


Fig. 2. Nodule du niveau Paquier des Marnes bleues du Bassin vocontien (Albien inférieur). Pelbiomicrosparite à juvéniles d'ammonites et ostracodes. Largeur du cliché : 6 mm.

Fig. 2. Nodule from the 'Niveau Paquier' ('Marnes bleues' from the Vocontian Basin, Lower Albian). Pelbiomicrosparite with juvenile ammonites and ostracoda. Width of the picture: 6 mm.

taillé montre que la matrice nodulaire est microsparitique et comporte de nombreux agrégats de 100 à 200  $\mu\text{m}$ , disposés selon les lamines; si certains *pellets* sont micritiques (teinte grisâtre) et renferment des coccolithes, beaucoup sont constitués de matière organique (teinte brun orangé) et renferment des spores d'algues (10–15  $\mu\text{m}$ ), ainsi que de petits globules susceptibles de représenter des bactéries (?). Le microfaciès de ces nodules est donc une pelbiomicrosparite. La composition isotopique montre un  $\delta^{13}\text{C}$  voisin de  $-15\text{‰}$  PDB et un  $\delta^{18}\text{O}$  de l'ordre de  $-3\text{‰}$ , tant à l'intérieur qu'à l'extérieur des nodules.

## 2.2. Les nodules du niveau Paquier [1,2] (Figs. 2 et 5)

Ils se rencontrent de manière sporadique.

– Aux Oustaus, les nodules ( $\pm 90\%$   $\text{CaCO}_3$ ), aplatis selon le litage, présentent une taille moyenne de plusieurs décimètres (jusqu'à 2 m). Ils présentent une structure laminée, qui se pince progressivement en périphérie, sous l'effet de la compaction. Quelques structures mécaniques sont détectables; des lamines tronquées sont recouvertes par des faisceaux de lamines en mamelons, suggérant des rides de tempêtes. Excepté quelques ammonites, ces miches ne présentent pas de matériel biogénique identifiable. Le mi-

crofaciès correspond à une matrice microsparitique, à rares éléments figurés. La composition isotopique montre une faible teneur en isotope lourd du carbone ( $\delta^{13}\text{C} = -13,2\text{‰}$  PDB).

– À Tartonne, les nodules ( $\pm 80\%$   $\text{CaCO}_3$ ) présentent une forme et une disposition singulières: il s'agit de couronnes, dont le diamètre extérieur mesure de quelques centimètres à environ 45 cm, la largeur et l'épaisseur, quelques centimètres; les couronnes sont généralement disposées en colonnes de hauteur métrique, autour d'un axe central occupé par une marne non laminée. Ces nodules présentent également une structure laminée, qui se pince vers l'intérieur et vers l'extérieur de la couronne. Le microfaciès est constitué d'une microsparite plus ou moins fine selon les lamines, incluant quelques lits de grains de quartz silteux. Ces concrétions se sont donc développées dans la marne laminée autour de terriers verticaux, tels ceux formés par des crustacés.

– Aux Coignets, bon nombre de nodules ( $\pm 85\%$   $\text{CaCO}_3$ ) sont aussi centrés sur des terriers verticaux; toutefois, dans certains cas, le lien avec la bioturbation n'est pas attesté. Leur microfaciès est une pelbiomicrosparite laminée. On reconnaît des faisceaux de lits à grains de quartz et glauconie (environ 50  $\mu\text{m}$ ), résultant d'apports par courants de faible énergie. Des ammonites juvéniles (250–500  $\mu\text{m}$ ) jouxtent souvent ces lits; radiolaires et foraminifères planctoniques sont nombreux; les spicules d'éponges sont fréquents. Les *pellets* sont assez aplatis, du fait d'une compaction substantielle. La teneur en isotope lourd du carbone est faible ( $\delta^{13}\text{C} = -22,5\text{‰}$  PDB).

## 2.3. Les nodules de la formation Querecual [10] (Fig. 3)

Cette formation montre un grand nombre d'horizons stratiformes à nodules calcaires (80–95%  $\text{CaCO}_3$ ). Si quelques-uns dépassent le mètre, la plupart sont pluricentimétriques. La structure laminée est presque toujours visible au sein des nodules, offrant une déformation progressive vers la périphérie, en réponse à la compaction. Cette lamination, consécutive à l'alignement d'abondants *pellets*, est en relation avec la lamination du sédiment encaissant. Sur l'un des échantillons (Q35), le nodule est pincé entre deux lamines à abondants foraminifères planctoniques et se situe au niveau d'un lit à foraminifères planctoniques rares et

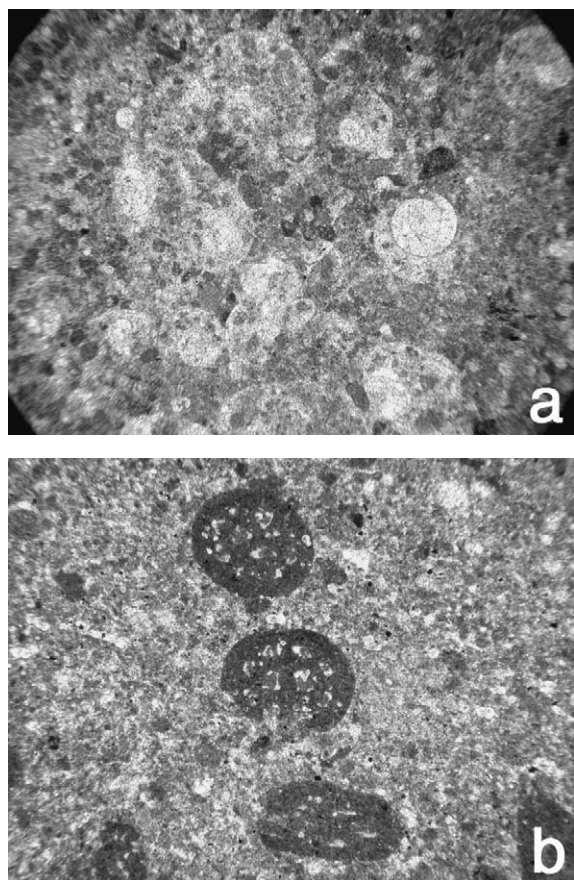


Fig. 3. (a) Nodule de la formation Querecual (Venezuela) du Cénomanién–Turonien. Pelbiomicrosparite à ammonites juvéniles. (b) Pelmicrosparite à microcoprolithes (igen. *Palaxius*). Largeur des clichés : environ 5 mm.

Fig. 3. (a) Nodule from Querecual (Venezuela), Cenomanian–Turonian. Pelbiomicrosparite with juvenile ammonites. (b) Pelbiomicrosparite with microcoprolithes (igen. *Palaxius*). Width of pictures: ca 5 mm.

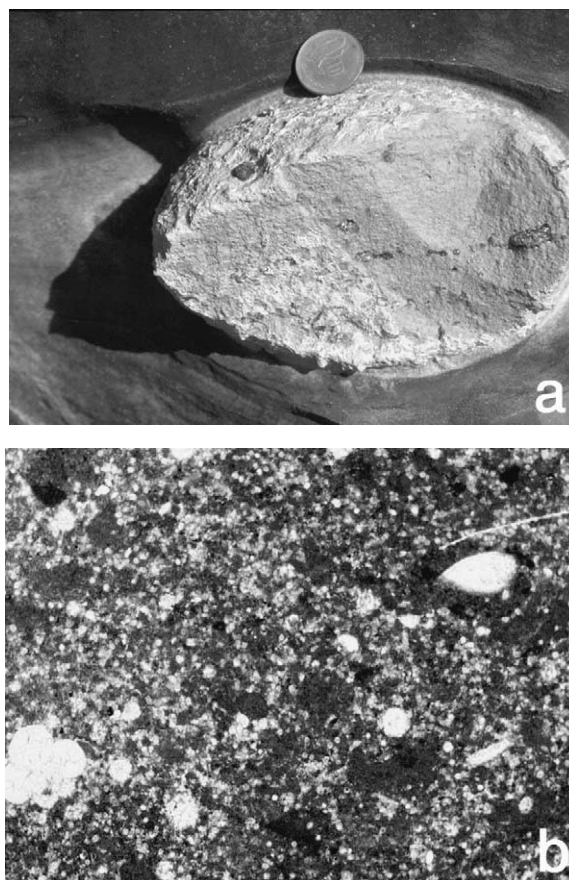


Fig. 4. (a) Nodule du bassin de Tarfaya (Turonien inférieur), montrant un lit à ammonites. (b) Pelbiomicrosparite à foraminifères, ostracodes, radiolaires et calcisphères (*Pithonella*). Largeur des clichés : environ 6 mm.

Fig. 4. (a) Nodule from the Tarfaya Basin (Lower Turonian), containing small size ammonites. (b) Pelbiomicrosparite with foraminifera ostracods, radiolarians, and calcispherids (*Pithonella*). Width of the picture: 6 mm.

de petite taille, mais riche en pelotes fécales à coccolithes (de brouteurs planctoniques). En revanche, d'autres nodules peuvent englober plusieurs lits à nombreux foraminifères planctoniques de taille habituelle. Si quelques nodules présentent des microcoprolithes de crustacés anomours (par exemple, *Palaxius*), de l'ordre du millimètre, la grande majorité montre des *pellets* de taille modeste (50 à 300  $\mu\text{m}$ ), de morphologie irrégulière ; certains sont composés de coccolithes, d'autres, plutôt arrondis et bien calibrés, sont formés d'une micrite argileuse, dénotant une origine

benthique. Dans ce dernier cas, des ammonites juvéniles (quelques centaines de microns) sont parfois présentes, à remplissage de sparite, ou parfois de pyrite. La matrice de beaucoup de ces nodules est constituée d'une microsparite dans laquelle se reconnaissent les fantômes de nombreux foraminifères ; radiolaires, diatomées et ostracodes s'y rencontrent également. Le microfaciès peut ici encore être décrit comme une pelbiomicrosparite. Dans l'ensemble, les nodules étudiés livrent donc des témoins évidents d'une activité benthique.

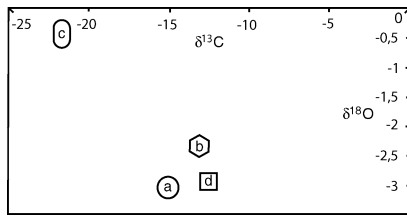


Fig. 5. Composition isotopique de nodules calcaires. (a) Toarcien des Schistes carton. (b) Albien inférieur du niveau Paquier, Les Oustaus. (c) Albien inférieur du niveau Paquier, Les Coignets. (d) Turonien inférieur de Tarfaya.

Fig. 5. Isotopic composition of calcareous nodules. (a) Toarcian Schistes Carton. (b) Lower Albian of Niveau Paquier, Les Oustaus. (c) Lower Albian of the 'Niveau Paquier', Les Coignets. (d) Lower Turonian of Tarfaya.

#### 2.4. Les nodules du bassin de Tarfaya [5,6] (Figs. 4 et 5)

Les nodules de Tarfaya ( $\text{CaCO}_3 > 95\%$ ) sont répartis selon des horizons stratiformes dans les *black shales* et présentent une lamination interne caractéristique, dont la déformation vers les bordures atteste la compaction différentielle. Une enveloppe siliceuse équatoriale se développe autour de ces concrétions. Elles contiennent d'abondants péloïdes, des ammonites, des bivalves, des foraminifères benthiques et planctoniques, ainsi que des pithonelles, des radiolaires et des diatomées. Si la disposition des nodules au sein des couches n'est pas clairement définie, leur richesse en bioclastes est caractéristique, par rapport aux marnes encaissantes ; ce fait était initialement interprété comme résultant d'une préservation différentielle [6]. Le  $\delta^{13}\text{C}$  est de l'ordre de  $-12,3\text{‰}$  PDB ( $\delta^{18}\text{O} = -2,9\text{‰}$ ) au cœur des concrétions.

Dans les quatre exemples évoqués, les nodules présentent en commun, outre une composition calcitique sous forme microsparitique, l'abondance de pyrite (essentiellement framboïdale), la fréquence de phosphates bioclastiques ou diagénétiques et la présence plus sporadique de barytine (notamment comme minéralisation des phragmocônes d'ammonites).

### 3. Interprétation

Les quatre exemples proviennent de *black shales* riches en matière organique, au faciès laminé, dont la genèse s'explique par une anoxie récurrente des

eaux de fond [1,5,8,10]. La structure laminée exprime des changements dans l'abondance relative de constituants, généralement d'origine planctonique, tels que foraminifères de taille normale et de petite taille, pelotes fécales à nannofossiles (produites par des brouteurs planctoniques), ostracodes, diatomées, radiolaires, mais elle intègre aussi des ammonites juvéniles. Ces changements résultent de variations dans les paramètres physico-chimiques de la colonne d'eau, notamment en surface, ainsi que dans sa structure stratifiée. Les nodules diagénétiques révèlent particulièrement bien cette lamination, préservée de la compaction.

#### 3.1. Les pellets et microcoprolithes

Les nodules sont, dans leur quasi-totalité, centrés sur des hétérogénéités sédimentaires. Cette corrélation nodules-hétérogénéités est si générale qu'elle ne saurait être fortuite. Qu'elles soient purement induites par des processus mécaniques (rides de tempêtes) ou qu'elles correspondent à des processus biogéniques (bioturbation, pelletisation), ces hétérogénéités sont le résultat de remaniements très précoces syn- ou post-dépôt. La conséquence première est vraisemblablement une porosité supérieure à celle de l'encaissant lors des premiers stades de l'enfouissement.

La question se pose à propos du rôle de l'activité des organismes benthiques dans la genèse des nodules. En effet, à côté des terriers proprement dits, qui fournissent souvent le support physique de concrétions, les déjections de la méiofaune épibenthique détritivore ou brouteuse (*pellets*, microcoprolithes) s'accumulent ; elles fournissent alors un substrat sableux au sein de vases, offrant ainsi une porosité plus élevée, donc favorable à des néogenèses diverses, telle la précipitation de calcite. Ainsi, les nodules pourraient résulter de la cimentation précoce d'une vase laminée, non perturbée par des organismes endobenthiques fouisseurs.

L'abondance des microcoprolithes étant restreinte aux nodules, elle dénote une certaine pérennité du site de développement de cette faune épibenthique, susceptible de durer des centaines, voire des milliers d'années ; la raison possible est que la pelletisation, ayant modifié les caractéristiques mécaniques et chimiques du sédiment, aurait favorisé localement l'implantation de certaines formes de vie (rétroaction). Étant donné leur extension limitée, il s'agirait d'îlots de vie méta-

zoaire benthique, l'épibenthos pouvant correspondre à différents organismes, notamment des annélides polychètes [4,7], mais aussi des mollusques gastéropodes, cette faune se nourrissant de tapis microbiens ou de la manne de matière organique planctonique. Toutefois, l'agencement en lamines des *pellets*, dû à leur variation d'abondance et de taille, montre que l'activité des organismes n'était pas constante dans le temps. Ces variations sont en relation avec les fluctuations des communautés planctoniques enregistrées dans les *black shales* encaissants.

### 3.2. Les ammonites juvéniles

La présence d'ammonites minuscules interprétées comme des juvéniles [8,9] se révèle relativement fréquente. Leur association avec les accumulations de *pellets* ne paraît pas le fruit du hasard et certains microcoprolithes pourraient correspondre, au moins en partie, aux produits cataboliques de ces animaux, en supposant que ces ammonites au stade juvénile aient été benthiques, en tout cas au moins près du fond. Elles devaient donc se nourrir sur le fond, soit de matières organiques sédimentées depuis la surface, hypothèse s'accordant de profondeurs variées, soit d'algues benthiques, solution limitée à la zone photique, soit de tapis microbiens benthiques, soit encore de la méiofaune (polychètes), hypothèses pouvant s'accommoder de profondeurs importantes – de tels voiles ont en effet été mis en évidence par exemple sur la marge Pérou–Chili [13]. Nous proposons ici l'hypothèse qu'un certain nombre de ces nodules représenteraient en quelque sorte la fossilisation de pontes d'ammonites.

On observera, par ailleurs, qu'un degré d'oxygénation suffisant était nécessaire pour maintenir, au moins pendant un certain temps, l'activité de ces organismes (ammonites), même si l'on peut supposer que les individus observés dans les nodules ont rencontré une mort prématurée aux périodes d'anoxie. Ceci illustre la variabilité des conditions d'oxygénation des eaux de fond, comme évoqué pour les Schistes carton et le niveau Paquier [2,9], et ce à toutes les échelles de temps : saisonnières, pluriannuelles. . . . Entre autres choses, et comme l'avaient suggéré Cuomo et Bartholomew [4], ces données rendent contestable l'attribution d'un degré d'oxygénation donné à un type de faciès, qui intègre, en fait, le télescopage de multiples événements.

## 4. Conclusions

Les observations effectuées sur les nodules calcaires de différentes formations de *black shales* ont permis de mettre en évidence une genèse basée sur la présence quasi systématique d'hétérogénéités, parfois issues de processus mécaniques, mais plus souvent d'origine biologique : bioturbations, déjections et, probablement, pontes, comme en témoigne la présence fréquente d'ammonites juvéniles. Ces indices de vie benthique attestent une oxygénation suffisante, au moins sporadique, du milieu habituellement pauvre en oxygène.

## Remerciement

Les auteurs remercient Daniel Vachard et un correcteur anonyme pour leurs remarques constructives.

## Références

- [1] J.-G. Bréhéret, Sur des niveaux de *black shales* dans l'Albien inférieur et moyen du Bassin vocontien (Sud-Est de la France) : étude de nannofaciès et signification des paléoenvironnements, Bull. Mus. nat. Hist. nat., Paris, 4<sup>e</sup> sér. 5 C (1983) 113–159.
- [2] J.-G. Bréhéret, L'Aptien et l'Albien de la Fosse vocontienne (des bordures au bassin). Évolution de la sédimentation et enseignements sur les événements anoxiques, Soc. Géol. Nord, Publ. n° 25, 1997, 614 p., 18 pl.
- [3] M.L. Coleman, Microbial processes: controls on the shape and composition of carbonate concretions, Mar. Geol. 113 (1993) 127–140.
- [4] M.C. Cuomo, P.R. Bartholomew, Pelletal black shale fabrics: their origin and significance, in: R.V. Tyson, T.H. Pearson (Eds.), Modern and ancient continental shelf anoxia, Geol. Soc. Spec. Publ. 58 (1991) 221–232.
- [5] A. El Albani, Les formations du Crétacé supérieur du bassin de Tarfaya (Maroc méridional) : sédimentologie et géochimie, thèse, université de Lille-1, 1995, 185 p.
- [6] A. El Albani, D. Vachard, W. Kuhnt, J. Thurow, The role of diagenetic carbonate concretions in the preservation of the original sedimentary record, Sedimentology 48 (2001) 875–886.
- [7] K.O. Emery, J. Hulsemann, The relationships of sediments, life and water in a marine basin, Deep-Sea Res. 8 (1962) 165–180.
- [8] M. Hanzo, À propos de nodules carbonatés du Toarcien inférieur de la région de Bettembourg (grand-duché de Luxembourg), in: 103<sup>e</sup> Congr. natl. Soc. sav., Nancy, sci., fasc. IV, 1978, pp. 343–349.
- [9] M. Hanzo, Milieu de dépôt et évolution diagénétique des argilites toarciennes d'après l'étude de nodules carbonatés des

- « Schistes carton » de Bettembourg (grand-duché de Luxembourg), *Sci. Terre* XXIII (1) (1979) 45–59.
- [10] A. Iatzoura, Caractérisation sédimentologique et géochimique d'une roche mère : la formation Querecual (Crétacé du Venezuela oriental), thèse, université Pierre-et Marie-Curie, Paris-6, UFR Sciences de la Terre, n° 94–11, 1994, 233 p.
- [11] R. Raiswell, Non-steady-state microbiological diagenesis, the origin of concretions and nodular limestones, in : J.D. Marshall (Ed.), *Diagenesis of Sedimentary Sequences*, *Geol. Soc. Spec. Publ.* 36 (1987) 41–54.
- [12] R. Raiswell, Chemical model for the origin of minor limestone-shale cycles by anaerobic methane oxidation, *Geology* 16 (1988) 641–644.
- [13] L.A. Williams, C. Reimers, Role of bacterial mats in oxygen-deficient marine basins and coastal upwelling regimes: preliminary report, *Geology* 11 (1983) 267–269.