

Distribution des bioconstructions et des bio-accumulations en réponse aux variations de l'accommodation stratigraphique à partir de l'exemple de la formation Simsima d'âge maastrichtien du Jabal Rawdah (Oman)

EMMANUELLE VENNIN¹, PASCAL BARRIER², EUSTOQUIO MOLINA³ et HENRI SOUDET⁴

Mots clés. – Maastrichtien, Oman, Plate-forme carbonatée à rudistes, Espace disponible, Contrôle tectonique.

Résumé. – L'étude d'un système de dépôt carbonaté dans le secteur oriental des Emirats-Arabs-Unis (UAE) et en Oman, par des méthodes de stratigraphie séquentielle haute résolution et l'analyse des associations fossiles, permet d'établir des relations entre les variations de l'espace disponible et la production de matière carbonatée squelettique. Alors que les analyses géodynamiques et de stratigraphie séquentielle indiquent les variations relatives de niveau marin, le détail des associations fossiles permet de préciser le comportement des écosystèmes en réponse aux transgressions et régressions des systèmes de dépôt. Certaines associations fossiles peuvent être indicatrices de variations de la profondeur des milieux de dépôt et renseignent sur les variations de l'espace disponible, ce qui permettra une amélioration de la prédiction de la géométrie des réservoirs dans l'exploration pétrolière et la quantification de la production de matière carbonatée squelettique en fonction des variations de l'espace disponible. La formation Simsima, d'âge maastrichtien (Crétacé supérieur), est caractérisée par un éventail de sédiments carbonatés, qui s'étend des milieux de plaines côtières aux domaines de plate-forme externe caractérisée par une sédimentation pélagique. Elle enregistre localement des systèmes complexes bioconstruits à algues rouges, rudistes et coraux, particulièrement sensibles aux perturbations du milieu et des systèmes progradants souvent caractérisés par des faciès de haute énergie, constitués de bio-accumulations à coraux isolés et à orbitoïdes. La reconstitution paléogéographique de la plate-forme maastrichtienne permet d'insister sur l'existence d'un paléorelief hérité d'origine tectonique. Enfin, la formation Simsima illustre l'une des dernières occurrences de plate-forme à rudistes d'âge maastrichtien. Le secteur géographique abordé dans ce travail est situé dans le domaine nord-oriental de la plate-forme arabe qui enregistre le passage de la limite Crétacé-Tertiaire.

Distribution of buildups and bioaccumulations according to the stratigraphic accommodation fluctuations in the Simsima Formation (Jabal Rawdah, Maastrichtian, Oman)

Key words. – Maastrichtian, Oman, Rudistid carbonate platform, Stratigraphic accommodation, Tectonic control.

Abstract. – The high resolution stratigraphy and fossil assemblage analyses of a carbonate system in the eastern United-Arab-Emirates and Oman suggest the existence of a causal link between palaeodepth, stratigraphic accommodation, carbonate factory and ecosystem evolution. Geodynamic and sequence stratigraphic analyses reveal changes in relative sea-level, whereas a detailed study of fossil associations allows us to establish their concurrent modifications related to change in accommodation space. This multidisciplinary approach should allow to improve prediction of geometric carbonate reservoir distribution and evaluate the bulk of carbonate factory associated with regressive and transgressive tendencies. The Simsima Formation, Maastrichtian (late Cretaceous) in age, has recorded a wide variety of carbonate depositional systems that evolve from coastal plain to outer shelf deposits. This stratigraphic unit includes buildups composed of red algae, rudists and corals, sensitive to relative sea-level fluctuations, and bioaccumulations characterized by isolated corals and benthic foraminifera. The palaeogeographic reconstruction across the Cretaceous-Tertiary transition suggests that seafloor was differentiated into topographic highs and lows that influenced the syndepositional processes recorded in the Simsima Formation.

ABRIDGED ENGLISH VERSION

Introduction

One of the main problematic topics in the study of carbonate platforms is the understanding of palaeontologic distribution related to palaeodepth indicative of change in stratigraphic accommodation. Data from Maastrichtian carbonate sediments of Oman suggest a causal link between change in ecosystems, carbonate factory and stratigraphic accommodation. The analyses of detailed high resolution stratigraphy and taxonomic diversity evolution permit to show a direct relationship between distribution of benthic assemblages and transgressive/regressive trends. This multidisciplinary approach using stratigraphic, sedimentologic and palaeontologic data improves the knowledge of disappearance events before the Cretaceous/Tertiary transition.

Stratigraphic architecture : bioconstructions and bioaccumulations

The twelve facies recognized in the outcrops of the Simsima Formation on the Jabal Rawdah [Vennin *et al.*, 1999] are arranged into two third-order depositional sequences, which are correlated throughout the Maastrichtian intra-platform ramps of the area. The episodic development of thin carbonate buildups (biostromes, bouquets and clusters rich in rudists and colonial corals) and thick carbonate bioaccumulations (dominated by rhodolites, isolated corals and foraminifera) is the distinctive feature of the middle-upper Maastrichtian Simsima sediments cropping out in the Jabal Rawdah (fig. 2). The buildups contain three sub-units which are, in order of appearance, rudistid biostromes, rudistid clusters and bouquets, and meandrine coral patches (fig. 3). Three bio-accumulated facies have been identified, respectively dominated by rhodolites, isolated corals and foraminifera.

1 MNHN, Lab. de Géologie, 43, rue Buffon, 75005 Paris.

2 IGAL, boulevard de l'Hautail, 95092 Cergy-Pontoise.

3 Universidad de Zaragoza, Dpto. de Geología, 50009 Zaragoza, Espagne.

4 ELF Exploration-Production, Dpt. DEREI, rue Larribau, 64018 Pau.

Manuscrit déposé le 6 janvier 1999; accepté après révision le 19 juillet 1999.

A detailed stratigraphic analysis reported in these deposits reflects successive steps of installation and development of buildups, probably controlled by subtle ecological changes (fig. 4): (i) development of rhodolit-dominant bioaccumulations in proximal areas and rudistid biostromes (*Hippurites* and *Durania*) in the distal platform, (ii) colonization by rudists (*Vaccinites* and *Dictyoptychus*) forming bouquets and clusters, (iii) domination of isolated corals (*Cunoolites*), (iv) colonization of the substrate by meandrine corals, associated with *Vaccinites* and *Dictyoptychus*, favouring the formation of continuous thickets, and (v) bioaccumulations of foraminifera (mainly *Omphalocyclus* and other orbitoids).

Fossil communities and stratigraphic accommodation

The study of fossil communities demonstrates the change in ecosystems controlled by stratigraphic constraints. The communities populating the carbonate depositional systems across the Cretaceous in the Jabal Rawdah are different under landward and seaward stepping modes: in landward stepping modes, bioconstructions composed of rudists and corals were widespread developed, whereas, coarser grained facies comprising bioaccumulations rich in isolated corals (*Cunoolites*) and foraminifera occur in seaward stepping modes. As a result, these sediments record a distinct replacement of ecosystems under conditions of increasing (steps P1 and P4) and decreasing accommodation (P3 and P5).

Sedimentary architecture

The episodic development of clusters rich in rudists and corals reflects the widespread colonization of pre-existing bedded to massive orbitoid sandbanks (sole substrat) by frame-builders. Causes favouring the brief thickening events are thought to be short-lived ecological processes associated with flooding pulses or shallowing-upward tendencies. Distinct sea-level fluctuations seem to have modified the environments to allow the episodic establishment of extensive coral (Step P4) and rudistid thickets (P1 and P2), and bioaccumulation deposits (P3 and P5). The return to shallower water substrats at the uppermost part of the Simsima Formation, due to shallowing-upward tendencies, prevented the thicket growth and led to the deposition of foraminiferal bioaccumulations, and green algae and miliolid grainstones.

Disappearance of benthic faunal assemblages in the Jabal Rawdah

Swinburne [1991] documented a middle Maastrichtian demise of rudistid bioconstructions in the Mediterranean region. A succession of disappearance events occurred in the middle-late Maastrichtian tropical carbonate platforms which were responsible for major depletion in bioconstruction diversity and stepwise disappearance of fossil communities. A complete succession recording the Upper Cretaceous crops out in the southeastern area of the Jabal Rawdah. The observed successions record the disappearance of the rudist-bearing carbonate platform facies (Maastrichtian) and the transition into hemipelagic to turbiditic facies (Danian). In contrast, the Simsima Formation located in the north-west of the Jabal Rawdah is deeply eroded and overlain by carbonate breccias (Palaeocene in age). Sea-level fluctuations seem to have modified the environment sufficiently to favour the disappearance of rudists and some foraminifera (*Loftusia* and *Siderolites*). The return to shallowing-upward conditions at the end of the Maastrichtian, prevented bioconstruction growth and led to the deposition of bioclastic deposits. Otherwise, a tectonic episode took place at the Danian accentuating the drowning of the platform margins where hemipelagic deposits were accumulated. This tectonic process exists since the end of the Maastrichtian [Roger *et al.*, 1998] and marks the abrupt drowning of the margin and prevent the development of carbonate platform deposits [Roger *et al.*, 1998].

Conclusions

The stratigraphic analysis of the Maastrichtian Simsima Formation shows a causal link between fossil association distribution and changes in stratigraphic accommodation. Built facies composed of rudistid biostromes and clusters, and meandrine coral thickets occur in transgressive trends, while bioaccumulations rich in *Cunoolites* (isolated corals) and foraminifera are restricted to regressive trends forming progradational shoals. Drowning processes of the platform are often indicated by the appearance of thin marls rich in *Loftusia*, *Siderolites* or planktonic foraminifera.

Profound modifications in terms of palaeogeographic patterns took place during the Maastrichtian. The sedimentation of the Simsima Formation is governed by the irregularity of an inherited ophiolitic substrate. The substrate of the former was differentiated into topographic highs and lows that influenced syndepositional processes. In addition, the disappearance of rudistid buildups and some foraminifera (such as *Loftusia* and *Siderolites*) are conditioned by important sea-level changes, e.g. the regressive trend recorded at the uppermost part of the Simsima Formation. An uppermost Maastrichtian tectonic episode favoured the drowning of the platform margins, where hemipelagic sedimentation was established preventing carbonate productivity to return in the Jabal Rawdah.

INTRODUCTION

L'une des problématiques actuelles dans l'étude des plateformes carbonatées anciennes réside dans la compréhension de la répartition floro-faunistique en fonction des variations de la profondeur de dépôt indicatrices des fluctuations de l'espace disponible. Cette répartition est un des facteurs déterminants lors de l'analyse de la production carbonatée, laquelle peut être quantifiée en fonction des différents systèmes biosédimentaires bioconstruits ou bio-accumulés à

l'aide d'un cadre biostratigraphique précis. Les sédiments carbonatés du Maastrichtien de l'Oman, caractérisés par la présence d'une part de bioconstructions à coraux, rudistes et algues rouges et, d'autre part, de bio-accumulations à coraux isolés (*Cunoolites*) et à foraminifères, permettent d'illustrer la relation directe existant entre la production carbonatée squelettique [«usine de carbonates»; Home-wood, 1996], la répartition des communautés benthiques et les variations de la profondeur des dépôts. Ce travail combine une approche de stratigraphie haute résolution et de

diversité taxinomique. L'approche de stratigraphie haute résolution met l'accent sur les répartitions spatiales et volumétriques des faciès au cours du temps [Vennin *et al.*, 1999]; les changements de faciès montrent des modifications du type et de l'abondance de matériel squelettique produits en milieu peu profond par les communautés dominantes. D'autre part, les variations de diversité taxinomique permettent de préciser l'enchaînement des différents événements marquant la proximité de la crise Crétacé-Tertiaire.

La sédimentation de la plate-forme maastrichtienne est également gouvernée par la présence d'une paléotopographie héritée. Plusieurs domaines de haut-fonds et grabens peuvent être individualisés et influencent la géométrie des dépôts comme la répartition des associations floro-faunistiques. Les dépôts de la formation Simsima comprennent l'un des derniers représentants d'un groupe éteint actuellement et ayant participé activement à l'élaboration de bioconstructions, les rudistes. L'évolution structurale du secteur NE des Emirats Arabes Unies, localisé à la terminaison nord-occidentale des montagnes d'Oman, contribue à la disparition progressive des plates-formes carbonatées dès le Maastrichtien supérieur par l'effondrement successif et l'installation d'une sédimentation hémipélagique à turbiditique [Roger *et al.*, 1998].

CADRE GÉOLOGIQUE ET STRATIGRAPHIQUE

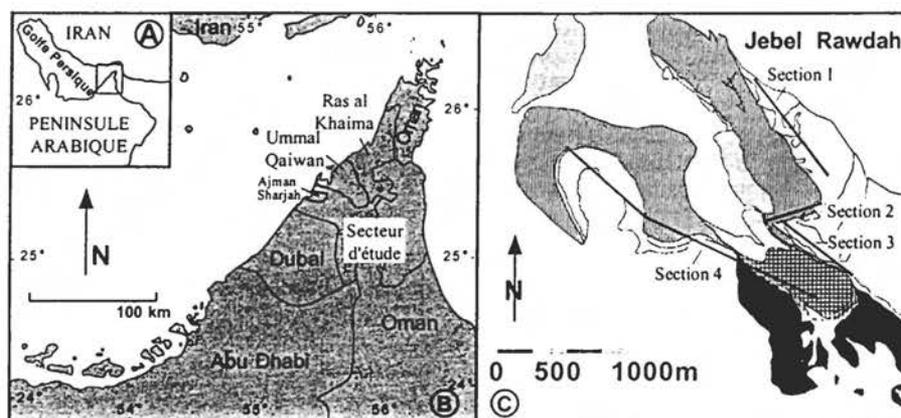
La succession stratigraphique du Crétacé supérieur (Campanien supérieur-Maastrichtien) affleurant aux Emirats-Arabs-Unis et en Oman a enregistré d'importantes variations latérales et verticales de faciès en relation avec une intense activité tectonique [Alsharhan et Nairn, 1990; Alsharhan, 1995; Roger *et al.*, 1998]. Les formations Qahlah et Simsima transgressent un socle ophiolitique et les écaillles tectoniques associés à l'installation du bassin d'avant-pays omanais [Glennie *et al.*, 1974; Alsharhan et Nairn, 1990; Skelton *et al.*, 1990]. Ces formations autochtones sont composées respectivement de conglomérats et grès pour la formation Qahlah et de dépôts carbonatés, bioconstruits ou

non, pour la formation Simsima. Cette dernière représente un excellent réservoir pétrolier dans le secteur d'Abu-Dhabi [Champ de Shah; Alsharhan, 1995]. Les bioconstructions à rudistes, algues et coraux dominants forment une étroite ceinture le long du front occidental des chaînes d'Oman. Le Maastrichtien correspond à une période de réajustement tectonique en contexte distensif et/ou décrochant [Roger *et al.*, 1998].

Le Jabal Rawdah se localise dans la partie occidentale de l'Oman à 60 km au nord de la ville de Al Ain-Buraymi (Emirats-Arabs-Unis) et à quelques kilomètres de la frontière avec les Emirats. Il est constitué d'affleurements continus offrant d'importantes variations latérales de faciès où 20 coupes et 4 sections de corrélations ont été levées (fig. 1).

Les ophiolites (péridotites serpentinisées du manteau ophiolitique de la nappe du Samail [Skelton *et al.*, 1990]) sont recouvertes par les dépôts continentaux à marins de la formation Qahlah. La partie inférieure de cette formation est constituée de latérites (1 à 5 m d'épaisseur) et la partie supérieure de conglomérats et grès (1 à 50 m d'épaisseur). La formation Simsima (70 à 110 m d'épaisseur) est constituée pour l'essentiel de grainstones sableux, de packstones [Roberston *et al.*, 1990; Skelton *et al.*, 1995], et localement de faciès bioconstruits à rudistes, algues rouges et coraux. Cette succession carbonatée contient un large spectre de fossiles représenté, parmi les plus abondants, par des rudistes, des coraux solitaires et coloniaux, des foraminifères benthiques et planctoniques, des éponges, des algues rouges et vertes, des gastéropodes, des échinides, des ostracodes, des ammonoïdes, des nautiloïdes, des bivalves et d'autres fossiles accessoires (certains foraminifères benthiques, arthropodes...). Selon les études biostratigraphiques réalisées par Ali [1992], Kennedy [1995], Morris [1995], Morris et Skelton [1995] et Smith *et al.* [1995], la formation Simsima est datée dans ce secteur de l'Oman, du Maastrichtien.

A l'échelle régionale [Roger *et al.*, 1998; Vennin *et al.*, 1999], les dépôts étudiés comprennent et sont surmontés de plusieurs niveaux de brèches synsédimentaires. Le plus ancien appartient au passage des formations Qahlah et Simsima où les conglomérats comblent les reliefs hérités du



LEGENDE

- Quaternaire
- Groupe Pabdeh (Paléocène)
- ▨ Brèches (Groupe Pabdeh)
- Formation Simsima
- Groupe Hawasina (Campanien supérieur)
- Groupe Semail (Cenomanien-Turonien)
- Sections de corrélation

FIG. 1. - Localisation géographique et carte géologique simplifiée du secteur d'étude, situation des différentes sections de corrélations établies pour le Jabal Rawdah (Oman).

FIG. 1. - Geographic location and simplified geological map of the studied area and correlation section established in the Jabal Rawdah (Oman).

substrat ophiolitique. Le second, situé dans le secteur sud-est du Jabal Rawdah, apparaît au toit de la formation Simsim; il est marqué par la présence d'une brèche composée de blocs décimétriques interstratifiés et emballés dans des calcaires à foraminifères benthiques et planctoniques. L'association fossile de cette matrice encaissante est caractéristique du Paléocène. Elle est recouverte par des faciès turbiditiques à hémipélagiques, localement interstratifiés par des brèches de composition diverse (blocs de la Formation Simsim, cherts, ophiolites et serpentinites), appartenant également au groupe Pabdeh [Paléocène; James et Wynn, 1965]. Les turbidites témoignent d'un ennoisement rapide de la plate-forme maastrichtienne [Skelton *et al.*, 1990] semblable à celui relevé par Roger *et al.* [1998] dans le secteur du Jabal Muthayminah.

ARCHITECTURE STRATIGRAPHIQUE : BIOCONSTRUCTIONS ET BIO-ACCUMULATIONS

Le développement épisodique de faciès bioconstruits et bio-accumulés compte parmi l'un des caractères discriminants du Maastrichtien de la formation Simsim affleurant au sein du Jabal Rawdah. Une analyse stratigraphique détaillée de ces systèmes biosédimentaires permet d'observer différentes phases d'installation, de développement et de disparition contrôlées par des variations écologiques du milieu.

L'ensemble des faciès de la formation Simsim, au nombre de 12 [Vennin *et al.*, 1999], caractérise deux modes de sédimentation dominants. Le premier est marqué par le développement, dans la partie inférieure, de faciès bioconstruits à coraux et rudistes et de bio-concrétions à algues rouges sur l'ensemble de la plate-forme. Le second, correspondant à la partie supérieure de la formation Simsim, est dominé par l'installation de bio-accumulations à foraminifères. La sédimentation s'effectue en domaine de rampes carbonatées de dimensions réduites (1 à 2 km).

Selon Vennin *et al.* [1999], deux séquences de dépôt de 3^e ordre [Vail *et al.*, 1991] et leurs surfaces de corrélations correspondantes ont été déterminées pour l'ensemble de la formation Simsim (fig. 2). Elles sont découpées en séquences décimétriques comprenant des cycles élémentaires pouvant être corrélés à l'échelle du Jabal Rawdah. Ce découpage séquentiel permet d'insister sur la relation existante entre la distribution floro-faunistique et les tendances à la diminution et l'augmentation de l'espace disponible. L'association fossile, dominée par des groupes fossiles tels que les rudistes, les foraminifères, les algues, les coraux, les céphalopodes, et les mollusques est caractéristique de conditions climatiques tropicales à sub-tropicales [Masse, 1992; Philip, 1998]. Parmi ces organismes, les rudistes, très abondants dans les bioconstructions de la plate-forme maastrichtienne, ont fait l'objet d'une description détaillée par Skelton *et al.* [1990] et Morris et Skelton [1995]. Ils sont représentés pour l'essentiel par des *Dictyoptychus*, *Vaccinites*, *Hippurites*, radiolitidés et, plus rarement, des *Biradiolitinae* et des *Sauvagesinae*.

La première séquence de dépôt, caractérisée essentiellement par des faciès bioconstruits et bio-accumulés, débute par une succession de faciès terrigènes-carbonatés colonisés par des algues rouges et des rudistes. La tendance transgressive déduite de l'analyse de ces faciès s'inverse en une tendance régressive marquée par le dépôt massif de *Cunolites* formant de véritables bio-accumulations. L'inflexion de ces deux tendances est soulignée par la présence de marnes à *Loftusia* qui indiquent un approfondissement du milieu de dépôt. La seconde séquence de dépôt débute par le développement des derniers faciès bioconstruits enregistrés sur le Jabal Rawdah et est interrompue par le dépôt de mar-

nes à *Loftusia*, ammonites et nautiloïdes. Ces sédiments sont ensuite recouverts par une épaisse série de prismes progradants qui indiquent la tendance régressive et sont composés essentiellement de packstones à foraminifères benthiques.

La formation Simsim du Jabal Rawdah comprend deux systèmes de production carbonatée décrits ci-dessous, l'un par des faciès à caractère bioconstruits et l'autre bio-accumulés.

Les faciès bioconstruits

Trois faciès bioconstruits ont été différenciés (fig. 3).

(1) *Les biostromes à rudistes* apparaissent comme des lentilles aplaties, de 20 à 50 cm d'épaisseur moyenne, rarement en dôme. Ces lentilles peuvent être coalescentes et s'étendre sur plus de 50 m de large sans dépôts de faciès de flanc. Les rudistes y sont préservés en position de vie et sont représentés pour l'essentiel par des *Hippurites*, des *Durania* et, plus rarement, des *Pseudosabina* de petite taille pouvant, lorsqu'ils sont associés, former des structures résistantes. Ils sont entourés de fragments bioclastiques de gastéropodes, de bivalves, d'échinides (*Globator*, *Petalobrius* et *Pygurostroma*), de foraminifères et d'ostracodes.

Ces biostromes se localisent dans la partie inférieure de la formation Simsim et s'installent sur les bio-accumulations à rhodolites dans le secteur proximal de la plate-forme, ou directement, par l'intermédiaire d'une «sole bioclastique», sur les conglomérats de la formation Qahlah dans le domaine le plus distal. La stabilité des structures bioconstruites résulte de leur mode d'implantation dans le sédiment et de leur mode de liaison. Cette association de rudistes entiers ou fragmentés, à laquelle s'ajoute de nombreux bioclastes fragmentés, transportés et une faible composante micritique et appartenant au groupe morphologique des «élévateurs» [Skelton, 1991], se développe dans des milieux de forte énergie dans la zone d'action des vagues de beau temps.

(2) *Les bioconstructions en «bouquets» de rudistes* sont composées de rudistes de type *Dictyoptychus* et *Vaccinites*. Elles présentent 2 m d'extension moyenne pour des épaisseurs de 40 à 50 cm. Les bouquets, organisés en chapelet, constituent des niveaux de corrélation à l'échelle du Jabal Rawdah et présentent plusieurs kilomètres d'extension latérale. Les rudistes, de grande taille, sont préservés en position de vie et intensément perforés par des éponges (clones). On les observe en association avec des coraux (*Cunolites*), des gastéropodes, des grands foraminifères (*Siderolites*, *Loftusia*, *Omphalocyclus*) et des échinides (*Hattopsis* et *Noeltingaster*). Le morphotype «élévateur» des *Dictyoptychus* et *Vaccinites* est associé aux substrats meubles, parfois boueux, restreints à des milieux d'énergie modérée perturbés par l'action épisodique des tempêtes. Ces rudistes poursuivent leur croissance partiellement enfouis dans le sédiment, comme en témoigne la répartition des nombreuses perforations par des éponges de la partie affleurante de l'organisme. Chacun des biostromes n'est caractérisé que par le développement d'un niveau de rudistes adultes dominés par un genre ou deux au maximum.

(3) *Les coraux méandriiformes* constituent des niveaux continus de plusieurs kilomètres d'extension latérale, et apparaissent sous forme de patches de 40 cm d'épaisseur en moyenne. Ils sont préservés en position de vie, entourés d'une matrice wackestone à packstone comprenant des débris de gastéropodes et des foraminifères (*Loftusia*, *Siderolites* et rotalidés). Les coraux sont associés à des *Dictyoptychus* en «bouquets». Deux niveaux de coraux méandriiformes permettent de corréler les différents affleurements du Jabal Rawdah et de reconstituer la géométrie des corps sédimentaires [Vennin *et al.*, 1999].

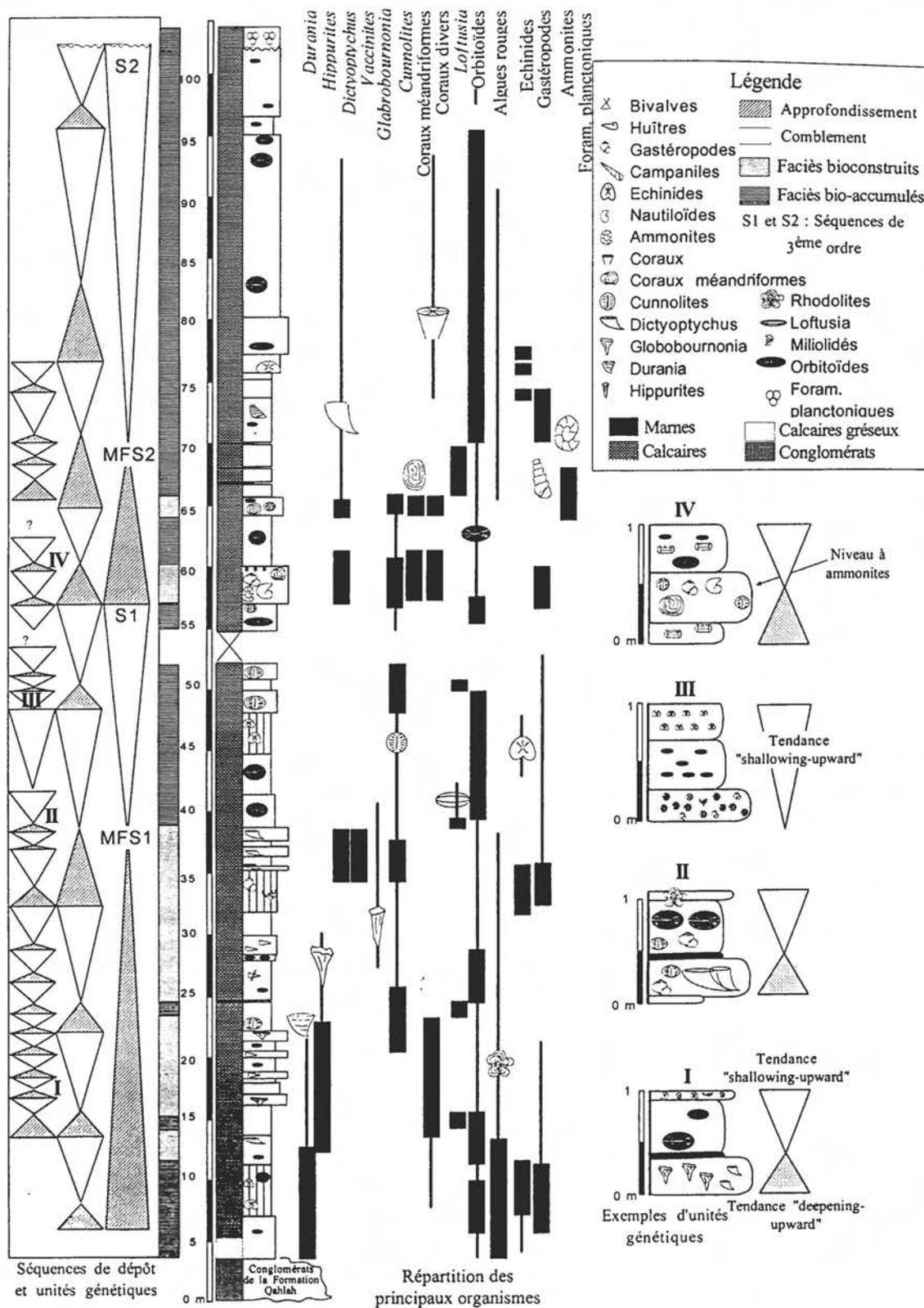


FIG. 2. – Répartition des principaux groupes fossiles et synthèse du découpage séquentiel de haute résolution de la formation Simsima à partir d'une coupe de référence du Jabal Rawdah.

FIG. 2. – Main fossil distribution and synthesis of sequence framework in the Simsima Formation for a type section of the Jabal Rawdah.

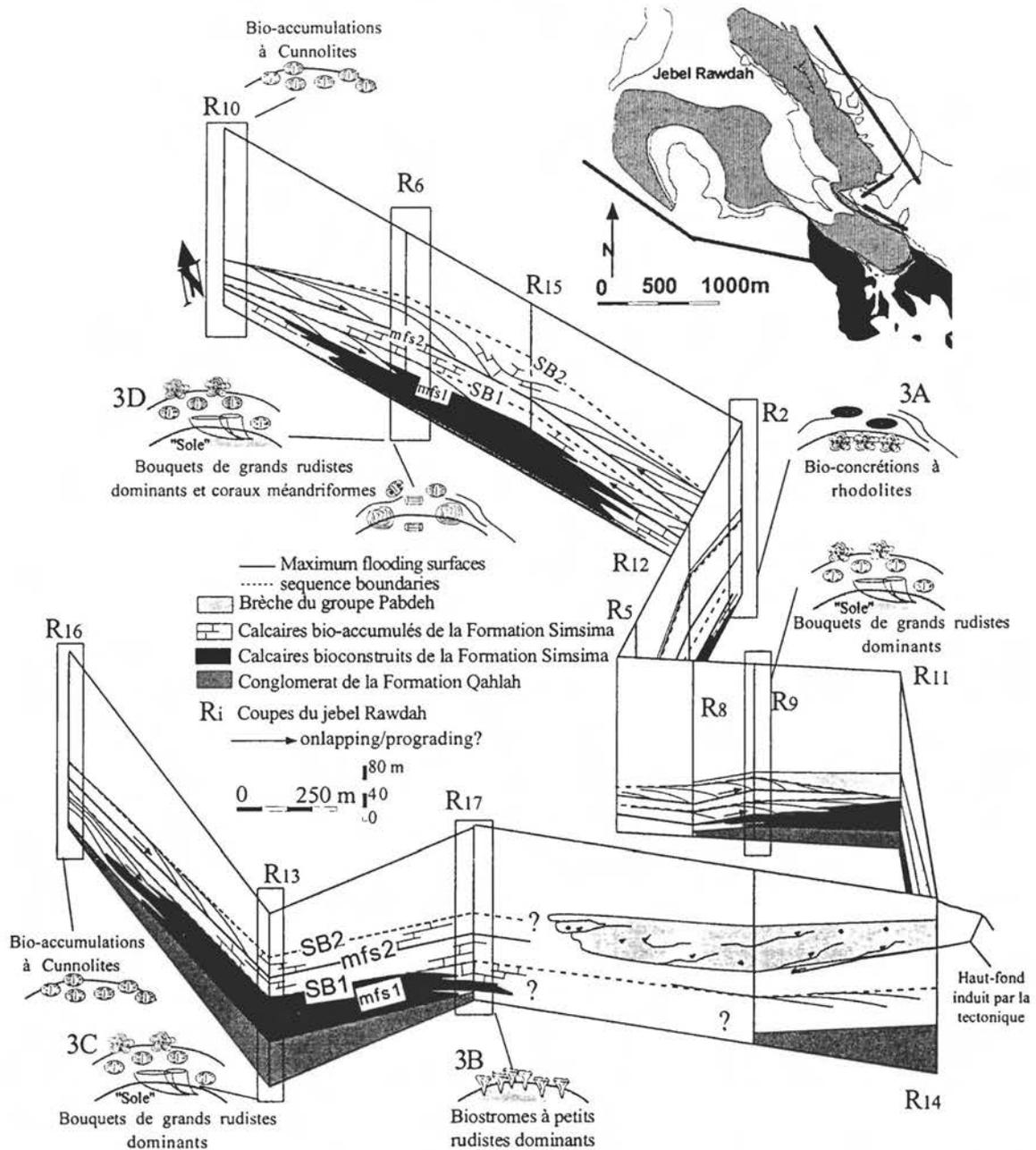


FIG. 3. – Diagramme schématique montrant la distribution des faciès de la formation Simsima et reconstitution paléogéographique pour l'ensemble du Jabal Rawdah. 3A. Bio-concrétions à rhodolites, 3B. Biostromes à petits rudistes, 3C. Bouquets de grands rudistes, 3D. Bouquets de grands rudistes et coraux méandriiformes.

FIG. 3. – Schematic fence diagram showing lateral distribution of carbonate facies and paleogeographical reconstruction of the Simsima Formation. 3A. Rhodolites bioconcretions, 3B. Rudistid biostromes, 3C. Rudistid bouquets, 3D. Rudistid and meandrine coral bouquets and clusters.

Les faciès de bio-accumulation

Trois faciès ont été distingués pour la formation Simsima.

(1) *Les bio-accumulations/bio-concrétions à rhodolites* atteignent des épaisseurs de 0,2 à 2 m (fig. 3A). Les rhodolites présentent un diamètre de quelques millimètres à 5 cm. Selon Montaggioni [1979], la forme et la structure interne des rhodolites sont gouvernées par l'énergie du milieu. Les formes sphéroïdes et de structures laminées indiquent des mouvements fréquents et une forte énergie du milieu [Bosence, 1983; Burgess et Anderson, 1983; Flood, 1983]. Les rhodolites observées dans les faciès du Jabal Rawdah présentent des formes globulaires, sont parfois encroûtés par

des foraminifères et sont constitués de noyaux à fragments bioclastiques qui permettent de proposer leur formation dans un environnement de forte énergie. Ils sont emballés dans une matrice packstone à foraminifères dominants. Les faciès à rhodolites, auxquels sont associés de nombreux bioclastes fragmentés, mal classés et transportés, et une faible composante de matrice micritique, se forment dans le secteur le plus proximal de la plate-forme dans la zone d'action des vagues de beau temps. Ils correspondent au premier faciès carbonaté qui se développe sur les conglomérats de la formation Qahlah (fig. 2). Localement, des algues rouges forment des arborescences ou «bouquets» ce qui a permis la stabilisation du substrat terrigène.

(2) *Les Cunnolites (coraux solitaires)* forment de véritables bio-accumulations pouvant atteindre plusieurs mètres d'épaisseur, pour une extension latérale kilométrique. Ils sont associés à quelques rares *Vaccinites* isolés, des gastéropodes, des chaetétidés, des algues rouges, des ostracodes, des échinides et des orbitoïdes. Le faciès à *Cunnolites* est parfois très fortement bioturbé et les coraux entiers montrent une orientation quelconque. Ils se développent, comme les fungidés actuels, sur un substrat meuble [Geczy, 1954 ; Hoeksema, 1991]. Selon Höfling [1989] et Hoeksema [1991], les *Cunnolites* prolifèrent dans des conditions de faible énergie et leur concentration dans un sédiment dont la faune est monospécifique semble indiquer un milieu restreint [Rehfeld et Ernst, 1998].

(3) *Les bio-accumulations à foraminifères* comprennent trois biofaciès différents. Dans le premier, composé de *Lofusia-Siderolites* et de rotalidés, les foraminifères (*Siderolites calcitropoides*, *Lenticulina sp.* et *Loftusia coxi*) sont parfois atteints de gigantisme, et se concentrent le plus souvent dans des niveaux marneux et intensément bioturbés ; leur disparition au sommet de la formation Simsima coïncide avec celle de nombreux rudistes (*Dictyoptychus*, *Durania*, et *Hippurites*). Leur présence semble correspondre à des approfondissements de la plate-forme et ils constituent d'excellents niveaux repères pour l'ensemble du Jabal Rawdah.

Le second biofaciès comprend des associations à orbitoïdes-*Omphalocyclus* et rotalidés. Il peut atteindre des épaisseurs importantes (supérieures à 10 m) les foraminifères étant associés à de nombreuses algues vertes, bivalves, gastéropodes et ostracodes. Les foraminifères, représentés par des *Orbitoides media*, *Omphalocyclus macroporus*, quelques miliolides et rotalidés, s'accumulent et constituent des biseaux de prismes progadants qui soulignent la diminution de l'espace disponible pour l'accumulation des sédiments.

Le troisième biofaciès est représenté, d'une part, par des foraminifères planctoniques d'âge maastrichtien qui correspondent aux domaines les plus distaux de la plate-forme et plus particulièrement de dépressions. Ils sont caractérisés par une association à *Globotruncana*, *Rugoglobigerina*, *Globotruncanella*, *Globotruncanita*, *Globigerinelloides* et *Heterohelix*. Ce faciès comprend, d'autre part, *Eoglobigerina*, *Globorotaloides*, *Acarinina*, et *Morozovella* qui indiquent un âge paléocène. Ces foraminifères s'observent dans une matrice emballant les brèches issues de l'érosion du sommet de la formation Simsima.

Phases d'installation des communautés bioconstruites et bio-accumulées

La figure 3 montre la répartition et la variation des principales associations fossiles dans l'espace et dans le temps sur l'ensemble du Jabal Rawdah. Plusieurs phases d'installation des faciès bio-accumulés et bioconstruits se sont succédées pour l'ensemble de la formation Simsima (fig. 4).

Phase 1. – Les bio-concrétions à rhodolites (figs. 3A et 4A) et les biostromes à petits rudistes de type *Durania* et *Hippurites* (fig. 3B) constituent les premières manifestations d'une importante production carbonatée sur cette plate-forme recouvrant les dépôts terrigènes de la formation Qahlah. Alors que les bio-concrétions à rhodolites se forment dans le domaine de forte énergie de la plate-forme, les biostromes à rudistes, caractérisés par une association fossile plus diversifiée, colonisent ces dernières mais indiquent des paléop profondeurs plus importantes toujours dans la zone d'influence des vagues de beau temps.

Phase 2. – Les bioconstructions à grands rudistes (les *Dictyoptychus* et *Vaccinites* sont associés sous forme de

«bouquets» ; fig. 3C et 4B) s'installent essentiellement dans les zones de la plate-forme où la tranche d'eau est suffisante pour faciliter leur croissance. L'abondance de matrice micritique, les fossiles associés entiers et l'intense bioturbation du faciès indiquent des conditions de faible énergie. Elles se situent sous la zone d'action des vagues de beau temps, en milieu marin ouvert. Les faciès bioconstruits sont intensément bioturbés et passent dans le secteur le plus proximal de la plate-forme à des bio-accumulations à *Cunnolites* et chaetétidés. Les valves de rudistes perforées par des clones et des annélides attestent d'un enfouissement lent des organismes.

Phase 3. – Les bio-accumulations à coraux de type *Cunnolites* (fig. 4C) succèdent progressivement aux bioconstructions à grands rudistes sur une plate-forme entièrement carbonatée. Ce faciès devient ubiquiste sur l'ensemble du Jabal Rawdah ; les *Cunnolites* sont associés à des foraminifères divers, des gastéropodes, des échinides et, plus rarement, de grands rudistes.

Phase 4. – La dernière manifestation de faciès bioconstruits est liée à la colonisation de coraux méandriques qui s'étendent sur plusieurs kilomètres (figs. 3D et 4D). Ces coraux sont associés à de grands rudistes, et à des foraminifères dans des faciès de wackestone/packstone fortement bioturbés. Vers le domaine interne de la plate-forme, ils disparaissent et sont remplacés par des foraminifères benthiques dans des faciès de packstones.

Phase 5. – Elle est marquée par d'épaisses bio-accumulations à foraminifères (fig. 4F) où abondent les orbitoïdes, les *Omphalocyclus* et les rotalidés associés à des algues vertes, des bivalves, et des ostracodes.

Les cinq phases de développement de faciès bio-accumulés et bioconstruits sont interrompues par des événements auto- et allocycliques, d'importance variable, ayant provoqués ou non un renouvellement des associations fossiles et un remplacement des communautés fossiles. L'interruption des phases 1, 2, 3 et 4 est nette et marquée par un remplacement des communautés benthiques. Le remplacement est attribué à des causes externes ou allocycliques, d'approfondissement de la plate-forme avec installation d'un faciès marneux à *Loftusia* (phases 1, 2 et 4), de baisse relative du niveau marin matérialisée par des faciès protégés à échinides et gastéropodes (phase 3) et par des packstones à miliolides et dasycladacées (phase 5). Enfin, la partie supérieure de la phase 5 est soulignée par une importante surface d'érosion surmontée d'un faciès de packstones fins à cherts contenant l'association fossile à foraminifères planctoniques d'âge paléocène. Il passe latéralement à une brèche synsédimentaire d'origine tectonique comprenant des blocs remaniés et lenticulaires constitués des différents faciès de la formation Simsima.

DISCUSSION

Communautés fossiles et espace disponible

Il existe une relation étroite entre la distribution des communautés fossiles et les fluctuations de l'espace disponible. L'asymétrie de répartition des communautés dans les cycles de transgression-régression a été envisagée de façon détaillée par Rollins *et al.* [1975] et Homewood [1996]. Les remplacements de communautés [Walker et Alberstadt, 1975], qui correspondent à des interruptions de la production carbonatée intensive, sont attribués à des perturbations externes ou allocycliques du milieu. La succession des différentes associations fossiles de la formation Simsima est interrompue soit par des périodes d'approfondissement de la plate-forme, indiquées par la présence de marnes à *Loftusia*, *Siderolites* et foraminifères planctoniques, soit par des sur-

faces d'arrêt de la sédimentation carbonatée attribuées à des baisses relatives du niveau marin. Les communautés fossiles qui caractérisent les dépôts de la formation Simsima sont considérablement différentes suivant la nature transgressive ou régressive du système de dépôt biosédimentaire. Il ressort de cette analyse que certaines associations floreo-faunistiques sont indicatrices des variations de la profondeur des dépôts et renseignent sur les fluctuations de l'espace disponible.

(1) *En tendance transgressive* (augmentation de l'espace disponible), les communautés fossiles sont dominées par la présence de rhodolites, de rudistes, et de coraux méandri-formes qui sont susceptibles d'élaborer des géométries bio-construites de types bio-concrétions, biostromes, bouquets et plus rarement patches. Les deux associations principales de rudistes décrites précédemment s'inscrivent au sein de la même tendance transgressive de 3^e ordre, mais répondent à des conditions hydrodynamiques différentes. Les biostromes à « petits rudistes » (*Hippurites* et *Cunolites*) sont situés dans la zone d'action des vagues permanentes. Les bouquets de « grands rudistes » (*Vaccinites* et *Dictyoptychus*) et de coraux méandri-formes sont caractérisés par une augmentation de la diversité floreo-faunistique, de la composante micritique et des organismes entiers et articulés. Ils se développent dans des environnements d'énergie modérée, sous la zone d'action des vagues permanentes. La limite supérieure de cette tendance transgressive est soulignée par un important niveau de marnes à *Loftusia* et *Si-*

derolites qui témoigne d'un approfondissement majeur à l'échelle du Jabal Rawdah.

(2) *En période régressive* (diminution de l'espace disponible), les bio-accumulations à coraux isolés et foraminifères s'étendent sur la plate-forme et s'organisent en cliniformes progradantes.

Architecture sédimentaire : facteurs allocycliques

L'étude des dépôts carbonatés de la formation Simsima d'âge maastrichtien nous amène à essayer de comprendre quels ont été les facteurs gouvernant l'architecture sédimentaire. Les variations relatives du niveau marin déduites du découpage séquentiel haute résolution permettent de discuter l'importance des facteurs externes ou allocycliques dans l'agencement géométrique des dépôts.

La partie inférieure de la formation Simsima est dominée par une sédimentation à caractère bioconstruit (fig. 2). Les bioconstructions sont ensuite remplacées par des faciès bio-accumulés épais. Les paroxysmes enregistrés de la production carbonatée squelettique se manifestent à deux reprises par le dépôt de faciès bio-accumulés à *Cunolites* (première séquence de dépôt de 3^e ordre ou S1) et à foraminifères (seconde séquence de dépôt de 3^e ordre ou S2) en période de diminution de l'espace disponible (tendance régressive). En période transgressive, la production carbonatée est alimentée par des faciès bioconstruits. Ces bioconstructions atteignent rarement leur climax (grande biodiversité) et leur

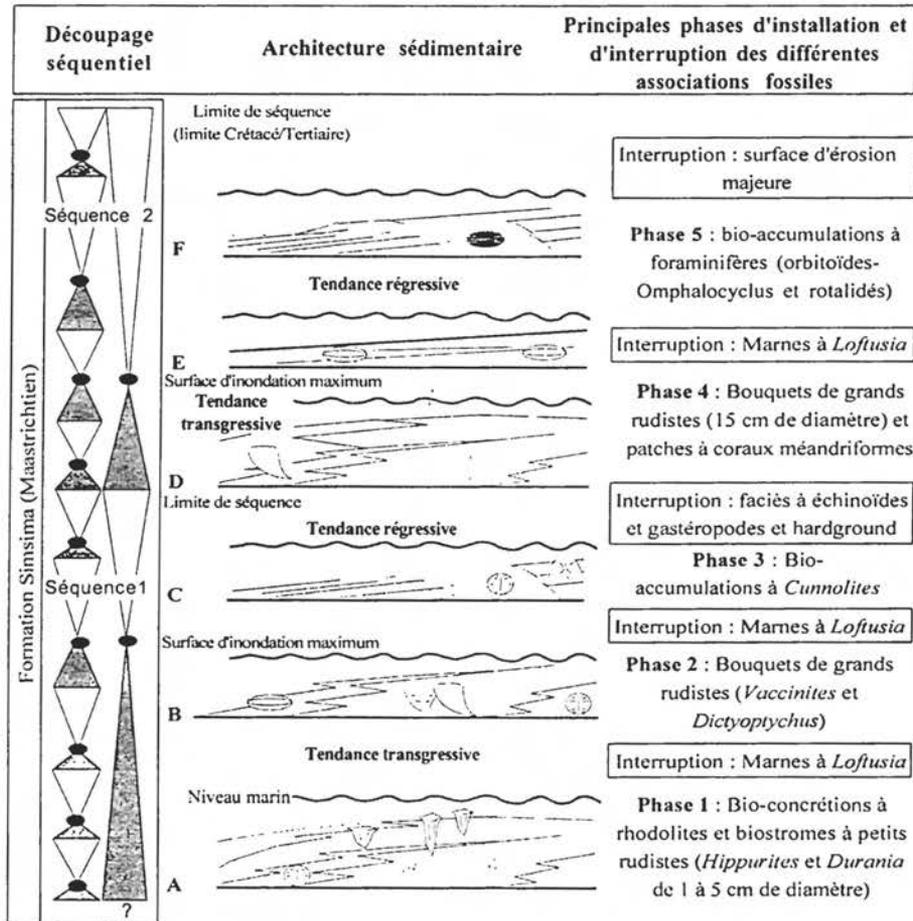


FIG. 4. – Distribution des communautés fossiles et organisation géométrique des faciès bioconstruits et bio-accumulés en fonction des tendances régressives-transgressives.

FIG. 4. – Community and geometrical architecture distribution of build-ups and bioaccumulations in the context of transgressive and regressive trends.

dimension reste modeste et dépasse rarement 2 m d'épaisseur. Toutefois, elles prospèrent dans les domaines de la plate-forme où l'espace disponible est suffisant pour en permettre le développement. Il s'agit, sur le Jabal Rawdah, de domaines de dépression générés par la présence de relief hérités d'un substrat ophiolithique irrégulier auxquels s'ajoutent des dépressions engendrées par l'activité d'une importante tectonique synsédimentaire (fig. 3). L'absence de discontinuité, de hiatus et de surfaces de condensation faunistique, la disparition des niveaux marneux (associés aux faciès bioconstruits) et l'épaisseur importante des faciès bioclastiques suggèrent une production carbonatée d'ordre de grandeur supérieur pour les bio-accumulations en comparaison à celle observée pour les faciès bioconstruits. Cependant, il est important d'insister sur la nécessité d'un calage biostratigraphique précis pour quantifier les variations du taux de production carbonatée au cours du dépôt de la formation Simsim. L'interruption des phases de croissance des organismes bioconstructeurs ou non (phases 1, 2, 3 et 4) marquée par des remplacements de communautés et attribuée à des facteurs externes de variations relatives du niveau marin régit la géométrie des dépôts sédimentaires. Alors que des niveaux continus bioconstruits s'édifient en tendance transgressive, des barres bioclastiques progradantes pouvant atteindre plusieurs décimètres s'empilent en tendance régressive. La phase 5 s'achève par une importante baisse de la profondeur au Maastrichtien supérieur [Hancock et Kauffman, 1979 ; Haq *et al.*, 1988 ; Skelton *et al.*, 1990 ; Vennin *et al.*, 1999] suivie au Maastrichtien terminal par un ennoiement de la plate-forme signalée en Oman par Roger *et al.* [1998].

Disparition des faunes benthiques sur la plate-forme carbonatée du Jabal Rawdah

La disparition des faciès bioconstruits enregistrée dans la partie médiane de la formation Simsim coïncide avec celle des rudistes et de certains foraminifères (*Loftusia* et *Siderolites*). Elle se manifeste, en premier lieu, par une chute de la diversité des rudistes lors de l'enregistrement de la seconde séquence de dépôt individualisée dans le secteur géographique étudié [Vennin *et al.*, 1999]. Les rudistes de cette séquence de dépôt ne sont plus représentés que par de très rares *Dictyoptychus* [Morris et Skelton, 1995]. Les faciès bioconstruits sont remplacés par des faciès bio-accumulés à foraminifères et gastéropodes, et ensuite, par des grainstones à dasycladacées, miliolidés et orbitoïdes.

Il semble qu'une dégradation progressive des environnements de dépôt, signalée par des faciès d'énergie élevée et un contexte tectonique local actif, soit à l'origine de la baisse de diversité et ensuite de la disparition des rudistes. L'enregistrement de la tendance régressive qui gouverne la sédimentation au toit de la formation Simsim est souligné par le dépôt de faciès de grainstones à miliolidés et dasycladacées, qui indique la modification des conditions écologiques et hydrodynamiques du milieu sur l'ensemble du Jabal Rawdah, à l'origine de la disparition des écosystèmes complexes bioconstruits. Cet épisode régressif du Maastrichtien supérieur est enregistré sur l'ensemble de la plate-forme d'Arabie [Roger *et al.*, 1998] et également à l'échelle mondiale [Haq *et al.*, 1987] et aboutit à la disparition des rudistes [Camoin *et al.*, 1995]. Toutefois, selon Philip [1998], la disparition des rudistes succède à une période d'intense activité évolutive qui accredit l'idée d'un bouleversement paléogéographique et écologique majeur. Il ressort de cette discussion que la disparition des rudistes sur la plate-forme carbonatée des Emirats et d'Oman est antérieure à la limite Crétacé-Tertiaire et est associée au retrait des plates-formes carbonatées pouvant résulter de causes

tectoniques enregistrées localement qui entraînent un ennoiement de la plate-forme. Des données radiométriques [Obradovich, 1993] permettent de dater du Maastrichtien moyen à supérieur différentes périodes d'extinction associées à la crise Crétacé-Tertiaire. Le recul et la disparition des bioconstructions à rudistes interviennent selon Swinburne [1991] dans la région méditerranéenne au Maastrichtien moyen. Les principales lignées d'inoceramidés disparaissent également à cette période [Ward *et al.*, 1991 ; MacLeod, 1994]. Les résultats apportés par ces diverses études suggèrent l'existence d'une succession de plusieurs événements d'extinction au Maastrichtien moyen et supérieur sur l'ensemble des plates-formes carbonatées tropicales. Ces événements seraient responsables d'une importante réduction de la diversité au sein des bioconstructions et de leur disparition [Johnson et Kauffman, 1990]. Le secteur paléogéographique du Jabal Rawdah n'échappe pas à ces perturbations et les bioconstructions à rudistes dominants et certains grands foraminifères (*Siderolites* et *Loftusia*) disparaissent dès le dépôt de la seconde séquence de dépôt, composée essentiellement de foraminifères benthiques et de gastéropodes, d'âge maastrichtien supérieur.

Reconstitution paléogéographique du Jabal Rawdah

Selon l'importance des mouvements tectoniques majeurs [Masse *et al.*, 1995], certains secteurs de la plate-forme arabe enregistrent une sédimentation plus ou moins continue. Les plates-formes à rudistes peuvent être directement surmontées de dépôts transgressifs du Thanétien [Roger *et al.*, 1989, 1998] ou marquées par des lacunes de sédimentation, comme dans la région du Huqf [Le Métour *et al.*, 1995], ou encore, être recouvertes des dépôts du Maastrichtien terminal puis du Danien en continuité comme dans les bassins de Buraymi et d'Abat [Roger *et al.*, 1998]. La reconstitution paléogéographique réalisée sur le Jabal Rawdah souligne l'existence d'une importante activité tectonique ayant agi dans ce secteur de la plate-forme par la présence d'une première brèche synsédimentaire d'âge anté-paléocène affectant le toit de la formation Simsim dans le secteur SE du Jabal. La fracturation de la plate-forme carbonatée générant cette brèche, s'inscrit dans le cadre d'une sédimentation hémipélagique et turbiditique, et est datée du Paléocène par la présence d'une association de foraminifères planctoniques sur le matériel prélevé pour cette étude. L'absence de cette brèche dans le secteur NW du Jabal Rawdah favorise la conservation de l'enregistrement sédimentaire continu de la formation Simsim. Cet enregistrement montre une tendance régressive, au Maastrichtien supérieur, illustrée par la présence de biseaux de progradation et l'établissement d'une sédimentation de forte énergie en milieu marin peu profond. Les dépôts maastrichtiens sont recouverts dans ce secteur par des sédiments pélagiques d'âge paléocène. La continuité de l'enregistrement stratigraphique des affleurements du Jabal Rawdah permet de préciser l'enchaînement des événements enregistrés ayant précédés la limite Crétacé-Tertiaire.

CONCLUSION

L'analyse stratigraphique des dépôts de la formation Simsim d'âge maastrichtien témoigne de l'existence d'une relation directe entre la répartition des associations fossiles et les variations de l'accommodation. A l'échelle de longue durée (2 à 5 Ma), les petites bioconstructions à rudistes (*Durania-Hippurites* et *Dictyoptychus-Vaccinites*) et à coraux méandriiformes et plus rarement quelques bio-concrétions à algues rouges (*rhodolites*) s'édifient lors d'épisodes d'augmentation de l'accommodation. Les faciès bio-accu-

mulés composés des associations à *Cunulites*/gastéropodes dominants et foraminifères (*Omphalocyclus*/orbitoïdes) se concentrent en période de diminution de l'accommodation et correspondent aux paroxysmes de l'enregistrement de la composante carbonatée squelettique sur la plate-forme située dans le secteur oriental des Émirats-Arabes-Unis et en Oman. Les périodes d'approfondissement de la plate-forme sont indiquées par une sédimentation souvent marneuse et l'essor des *Lofusia* et *Siderolites* atteints de gigantisme et par la présence de foraminifères planctoniques. Le développement des biostromes, des patches et des bouquets de rudistes s'effectue au cours des premières étapes des phases transgressives où ils constituent des niveaux continus et de corrélation sur l'ensemble du Jabal Rawdah. Les bioconstructions s'installent à la faveur d'une baisse puis d'un arrêt de l'alimentation en terrigènes caractéristique de la formation Qahlah au niveau du Jabal Rawdah. Cette évolution est identique à celle proposée par Platel *et al.* [1994] pour les dépôts du massif du Haushi-Huqf (Oman) au cours du Campanien.

L'existence d'un contexte tectonique actif modifie considérablement la paléogéographie de ce secteur de la plate-forme de l'Oman et des Émirats-Arabes-Unis. D'une part, les dépôts carbonatés de la formation Simsima sont influen-

cés par un héritage tectonique. Ils se mettent en place sur un relief ophiolitique et partiellement comblé par les sédiments de la formation Qahlah. D'autre part, la plate-forme subit ensuite une réorganisation intensive entraînant sa disparition par effondrement au Paléocène (Tertiaire). Localement, l'enregistrement de la régression de la seconde séquence de dépôt est préservé dans le secteur septentrional du Jabal Rawdah alors que son domaine méridional est érodé. La disparition des rudistes et de certains grands foraminifères est associée à une modification des conditions de sédimentation liées à une baisse eustatique généralisée au Maastrichtien supérieur, puis aux contraintes tectoniques régionales et locales modifiant la géométrie des plates-formes carbonatées et favorisant le dépôt d'une sédimentation hémipélagique à turbiditique au Tertiaire.

Remerciements. – Les auteurs remercient les rapporteurs de ce manuscrit, J. Philip et J. Roger pour leur contribution à l'amélioration de cette note par leurs commentaires critiques et constructifs. L'entreprise Elf Exploration-Production est remerciée pour son autorisation de publication. Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet ARTEP visant à la « quantification des réservoirs carbonatés ». Il fait suite à une mission de terrain de cinq semaines aux Émirats-Arabes-Unis réalisée en novembre 1997. Les auteurs remercient les différents participants de cette mission.

Références

- ALI M.S.M. (1992). – Additional echinoids from the late Maastrichtian (Cretaceous) of Gebel El Rowdah, Oman-United Arab Emirates. – *N.Jb. Geol. Paläont.*, 65-74.
- ALSHARAN A.S. (1995). – Facies variation, diagenesis and exploration potential of the Cretaceous rudist-bearing carbonates of the Arabian Gulf. – *AAPG Bull.*, 79, 4, 531-550.
- ALSHARHAN A.S. & NAIRN A.E.M. (1990). – A review of the Cretaceous Formations in the Arabian Peninsula and Gulf: Part III. Upper Cretaceous (Aruma Group) stratigraphy and paleogeography. – *J. Petrol. Geol.*, 13, 3, 247-266.
- BOSENCE D.W.J. (1983). – The occurrence and ecological recent rhodolites – A review. In: T.M. PERYT Ed., Coated grain. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 225-242.
- BURGESS C.J. & ANDERSON J.M. (1983). – Rhodoids in temperate carbonates from the Cenozoic of New Zealand. In: T.M. PERYT Ed., Coated grain. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 243-258.
- CAMOIN G., ARNAUD-VANNEAU A., BERGERSEN D.D., COLONNA M., EBREN P., ENOS P. & OGG J.G. (1995). – Anatomy and evolution of the Inner Perimeter Ridge (Sites 874 and 877) of a Campanian-Maastrichtian atoll-like structure (Wodejebato guyot, Marshall Islands). – *Proc. Ocean Drill. Progr. Scient. Results*, 144, 271-294.
- FLOOD P.G. (1983). – Coated grains from the Great Barrier Reef. In: T.M. PERYT Ed., Coated grain. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 562-565.
- GECZY B. (1954). – Studien über Cycloliten (Anth.). – *Geol. Hung.*, 24, 77-158.
- GLENNIE K., BOEF M.G.A., HUGHES CLARKE M.W., MOODY-STUART M., PILAAR W.F.H. & REINHARD B.M. (1974). – Geology of the Oman Mountains (Parts 1, 2 and 3). – *Verh. Koninklijk Nederlands Geol. Mijnb. Genoots.*, 31, 423 p.
- HANCOCK J.M. & KAUFFMAN E.G. (1979). – The great transgressions of the late Cretaceous. – *J. Geol. Soc. London*, 136, 175-186.
- HAQ B.U., HARDENBOL J. & VAIL P.R. (1987). – Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. – *Science*, 235, 1566-1567.
- HAQ B.V., HANDBOL J. & VAIL P.R. (1988). – Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea-level changes. In: K.W. WILGUS, H. POSAMENTIER, B.S. HASTINGS, J. VAN WAGONER & C.G. ST. C. KENDALL Eds., Sea-level changes: An integrated approach. – *Soc. Econ. Paleont. Mineral. Spec. Publ.* 42, 71-108.
- HOEKSEMA B.W. (1991). – Phenotypic corallum variability in Recent mobile reef corals. In: P. OEKENTORP-KÜSTER Ed.: Proc. 6th Int. Symp. Fossil Cnidaria, 25-29 July, 1988. – *Mem. Ass. Australas. Palaeontols.*, 8, 51-60.
- HÖFLING R. (1989). – Substrate-induced morphotypes and intraspecific variability in Upper Cretaceous scleractinians of the eastern Alps (West-Germany, Australia). In: U. REHFELD & G. ERNST Eds. (1998), Hydrozoan build-ups of *Millepora irregularis* sp. nov. and fungiid coral meadows of *Cunulites ALLOITEAU* (Anthozoa). Palaeoecological and palaeoceanographical implications for the Upper Cretaceous of North Cantabria (northern Spain). – *Facies*, 39, 125-138.
- HOMEWOD P. (1996). – The carbonate feedback system: Interaction between stratigraphic accommodation, ecological succession and the carbonate factory. – *Bull. Soc. géol. Fr.*, 167, 6, 701-715.
- JAMES G.A. & WYNS R., (1965). – Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area. – *AAPG Bull.*, 49, 12, 2182-2245.
- JOHNSON C.C. & KAUFFMAN E.G. (1990). – Originations, radiations and extinctions of Cretaceous rudistid bivalve species in the Caribbean Province. In: E.G. KAUFFMAN & O.H. WALLISER Eds, Extinction events in Earth history. – Springer-Verlag, Berlin, 305-324.
- KENNEDY W.J. (1995). – Maastrichtian ammonites from the United Arab Emirates-Oman border region. – *Bull. Nat. Hist. Mus. Lond.*, 51, 2, 241-250.
- LE METOUR J., MICHEL J.C., BECHENNEC F., PLATEL J.P. & ROGER J. (1995). – Geology and mineral wealth of the Sultanate of Oman. – Ministry of Petroleum and Minerals, Muscat, 285 p.
- MACLEOD K.G. (1994). – Bioturbation, inoceramid extinction, and mid-Maastrichtian ecological change. – *Geology*, 22, 139-142.
- MASSE J.P. (1992). – The Lower Cretaceous Mesogean benthic ecosystems: palaeoecologic aspects and palaeobiogeographic implications. – *Palaeogeogr. Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 91, 331-345.
- MASSE J.P., PHILIP J. & CAMOIN G. (1995). – The Cretaceous Tethys. In: E.N. NAIRN *et al.*, Eds. The ocean basins and margins, 8: The Tethyan Ocean. – Plenum Press, New York, 215-236.
- MONTAGGIONI L.F. (1979). – Environment significance of rhodolites from the Mascarene reef province, western Indian Ocean. – *Bull. Centre. Rech. Elf Explor. Prod.*, 3, 2, 713-723.

- MORRIS N.J. (1995). – Maastrichtian nautiloids from the United Arab Emirates-Oman order region. – *Bull. Nat. Hist. Mus. Lond.*, **51**, 2, 241-231.
- MORRIS N.J. & SKELTON P.W. (1995). – Late Campanian-Maastrichtian rudists from the United Arab Emirates-Oman border region. – *Bull. Nat. Hist. Mus. Lond.*, **51**, 2, 277-305.
- OBRADOVICH J. (1993). – A Cretaceous time scale. In : W.G.E. CALDWELL & E.G. KAUFFMAN, Eds, Evolution of the Western Interior Basin. – *Geol. Ass. Canada, Spec. Paper*, **39**, 379-396.
- PHILIP J. (1998). – Biostratigraphie et paléogéographie des rudistes : évolution des concepts et progrès récents. – *Bull. Soc. géol. Fr.*, **169**, 5, 689-708.
- PLATEL J.P., PHILIP J., BOURDILLON-DE-GRISSAC C., BABINOT J.F., ROGER J. & MERCADIER C. (1994). – Modalités de la transgression campanienne sur le massif du Haushi-Huqf (Oman). Stratigraphie, contexte géodynamique et paléoenvironnements. – *Bull. Soc. géol. Fr.*, **165**, 147-161.
- REHFELD U. & ERNST G. (1998). – Hydrozoan build-ups of *Millepora irregularis* sp. nov. and fungiid coral meadows of *Cunnolites Alloitea* (Anthozoa) – Palaeoecological and palaeoceanographical implications for the Upper Cretaceous of North Cantabria (northern Spain). – *Facies*, **39**, 125-138.
- ROBERTSON A.H.F., SEARLE M.P. & RIES A.C. (1990). – The geology and tectonics of the Oman region. – *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, **49**, 845 pp.
- ROGER J., PLATEL J.P., CAVELIER C. & BOURDILLON DE GRISSAC C. (1989). – Données nouvelles sur la stratigraphie et l'histoire géologique du Dhofar (Sultanat d'Oman). – *Bull. Soc. géol. Fr.*, (8), 265-277.
- ROGER J., BOURDILLON C., RAZIN P., LE CALLONNEC L., RENARD M., AUBRY M.P., PHILIP J., PLATEL J.P., WYNS R. & BONNEMAISON M. (1998). – Modifications des paléoenvironnements et des associations biologiques autour de la limite Crétacé-Tertiaire dans les montagnes d'Oman. – *Bull. Soc. géol. Fr.*, **169**, 2, 255-270.
- ROLLINS H.B., CAROTHERS M. & DONAHUE M. (1975). – Transgression, regression and fossil community dynamics. – *Lethaia*, **12**, 89-104.
- SKELTON P.W. (1991). – Morphogenetic versus environmental cues for adaptive radiations. In : N. SCHMIDT-KITTLER & K. VOGEL Eds, Constructional morphology and evolution. – Springer-Verlag, Berlin, 375-388.
- SKELTON P.W., NOLAN S.C. & SCOTT R.W. (1990). – The Maastrichtian into the northwestern flank of the Proto-Oman Mountains : sequences of rudist-bearing beach to open shelf facies. In : A.H.F. ROBERTSON, M.P. SEARLE & A.C. RIES Eds, The geology and tectonics of the Oman region. – *Geol. Soc. Spec. Publ.*, **49**, 521-547.
- SMITH A.B., MORRIS N.J. & GALE A.S. (1995). – Late Cretaceous carbonate platform faunas of the United Arab Emirates-Oman border region. – *Bull. Nat. Hist. Mus. Lond.*, **51**, 2, 91-119.
- SWINBURNE N.H.M. (1991). – Tethyan extinctions, sea-level changes and the Sr-isotope curve in the 10 Ma preceding the K/T boundary. – *EOS, Trans. Am. Geophys. Un.*, **72**, suppl., 267.
- VAIL P.R., AUDEMARD F., BOUMAN S.A., EISNER P.N. & PEREZ-CRUZ C. (1991). – Stratigraphic signatures of tectonics and eustasy and sedimentology – an overview. In : G. EINSELE, W. RICKEN & A. SEILACHER Eds, Cycles and events in stratigraphy. – Springer Verlag, Berlin, 671-659.
- VENNIN E., BARRIER P., SOUDET, H., BIDEAU, T. & PROUDHON B. (1999). – Architecture des corps sédimentaires carbonatés du Maastrichtien des Emirats-Arabes-Unis. – *Bull. Elf Explo. Prod.*, **22**, 1.
- WALKER K.P. & ALBERSTADT A. (1975). – Ecological successions as an aspect of structure in fossil communities. – *Paleobiology*, **1**, 3, 238-257.
- WARD P., KENNEDY W.J., MACLEOD K.G. & MOUNT J. (1991). – End Cretaceous molluscan extinction pattern in Bay of Biscay K/T boundary sections : Two different patterns. – *Geology*, **19**, 1181-1184.