

# *Beachrocks* et variations récentes de la ligne de rivage en Mer Égée dans l'ensemble insulaire Mykonos–Délos–Rhénée (Cyclades, Grèce)

## *Beachrock and recent sea-level changes on Mykonos, Delos and Rhenia islands (Cyclades, Greece)*

Stéphane Desruelles\*, Éric Fouache\*\*, Kosmas Pavlopoulos\*\*\*, Rémi Dalongeville\*\*\*\*,  
Jean-Pierre Peulvast\*\*\*\*\*, Yvan Coquinot et Jean-Luc Potdevin\*\*\*\*\*

### Résumé

Les baies de l'ensemble insulaire Mykonos-Délos-Rhénée, situé au centre des Cyclades (Grèce), sont presque toutes ourlées de deux ou trois alignements de dalles de *beachrocks* submergés, séparés par des étendues sableuses. L'alignement le plus profond et le plus éloigné du rivage se situe, en moyenne, entre 3,50 m et 3,70 m de profondeur. Le second alignement, situé en position intermédiaire, est entre 1,10 m et 3,80 m de profondeur. L'alignement le moins profond et le plus proche du rivage est entre 0 m et 2,10 m de profondeur. Ces *beachrocks* submergés résultent de trois phases de stabilisation de la ligne de rivage. L'objectif de cette étude est d'utiliser ces grès de plage comme marqueurs et comme repères datables d'anciens étages médiolittoraux et d'établir une courbe de remontée relative du niveau marin à partir de ces datations. L'étude des lames minces au microscope polarisant, au MEB et en cathodoluminescence a permis de nous assurer que les éléments et structures carbonatés que contiennent les échantillons se sont mis en place, au moins en partie, dans l'étage médiolittoral. Elle nous a aussi conduits à choisir la méthode de datation au <sup>14</sup>C par AMS sur échantillon total : les ciments diagénétiques ont semblé difficiles à extraire manuellement et les sources de pollutions carbonatées ont paru limitées dans le contexte cristallin de l'étude. Les résultats des datations permettent de proposer une courbe de remontée relative du niveau marin au cours de ces six derniers millénaires à l'échelle de l'ensemble Mykonos-Délos-Rhénée et de discuter des effets de cette évolution sur les variations des lignes de rivage des trois îles. Nous reconstituons notamment un niveau marin à environ -2,50 m ( $\pm 0,50$  m) aux alentours de 400 av. J.-C.

**Mots clés :** *beachrock*, cimentation précoce, variations du niveau marin, Holocène, Cyclades, Grèce.

### Abstract

*On the islands of Mykonos, Delos and Rhenia, located in the centre of the Cyclades (Greece), up to three submerged beachrock benches separated by sandy areas can be observed. These benches correspond to two or three generations of beachrock. In order to project a curve of sea-level rise that will contribute to the reconstruction of the shoreline of the ancient city of Delos, samples were collected in seven sites located within the three islands. The samples were studied using a polarising microscope, cathodoluminescence and an electron scanning microscope, and then prepared for AMS radiocarbon dating. Age results make it possible to propose a curve of relative sea-level rise during the last 6 kyr at the scale of that particular group of islands and to discuss the effects of this evolution on shoreline variations.*

**Key words:** *beachrock*, early diagenesis, sea-level changes, Holocene, Cyclades, Greece.

\* EA 2579 DEPAM, UFR de Géographie, université Paris-Sorbonne et UMR 8505, CNRS-IEDD ENS I.S.H. Lyon-Fontainebleau, France. E-mail : stephane\_desruelles@yahoo.fr

\*\* IUF, Paris, EA 435 GEONAT, département de Géographie, université de Paris Val de Marne, Créteil. E-mail : eric.g.fouache@wanadoo.fr

\*\*\* Département de Géographie, université Harokopio, Athènes, Grèce. E-mail : kpavlop@hua.gr

\*\*\*\* Archéorient, université Lumière-CNRS, Maison de l'Orient Méditerranéen-Jean Pouilloux, Lyon, France. E-mail : remi.dalongeville@mom.fr

\*\*\*\*\* EA 2579 DEPAM, UFR de Géographie, université Paris-Sorbonne et UMR 8616 ORSAYTERRE, CNRS, Orsay, France. E-mail : jean-pierre.peulvast@wanadoo.fr

\*\*\*\*\* UMR PBDS, UFR des Sciences de la Terre, université des Sciences et Technologies, Lille. E-mail : yvan.coquinot@univ-lille1.fr ; Jean-Luc.Potdevin@univ-lille1.fr

## Abridged English Version

Due to the presence of many submerged ancient ruins, scientific interest in sea-level variations in the Mykonos, Delos and Rhenia islands (centre of the Cyclades) is not new (Negris, 1903, 1904a and 1904b; Cayeux, 1907, 1911 and 1914). Within the framework of a research program entitled "Water in Delos", directed by M. Brunet and financially supported by the French School of Archaeology in Athens, beachrock occurrences were studied as natural indicators of sea-level changes. Beachrock is formed in the intertidal zone by cementation of sands by carbonate during shoreline stabilisation. It only becomes exposed during the retreat of the sea (Dalongeville and Sanlaville, 1984). Due to the short time required for its formation, beachrock can be used as an indicator defining ancient coastlines as well as an ancient sea level. The main problem is dating its formation using  $^{14}\text{C}$ . The most reliable method comprises the manual extraction of the cement and the sorting of each sample according to the chemistry and morphology of the cement, but this method cannot be used for weakly developed cements.

In most of the bays of these islands are two or three submerged beachrock benches, separated by sandy areas. The aforementioned beachrocks correspond to generations resulting from two or three periods of coastline stabilisation during the Holocene. The deepest benches are located at an average depth of 3.5–3.7 m, the second level is observed between 1.1 m and 3.8 m and the upper one is situated between 0 m and 2.1 m.

Seven sites were selected within the three islands, taking into account their geological and tectonic setting. The islands are mainly underlain by Miocene granite (Lucas, 1999), cut by faults believed not to have been activated since the Pliocene (Hejl *et al.*, 2002). A few limestone outcrops (Miocene molasses, calcarenites) are identified in the vicinity of some of the bays.

The samples taken from the seven sites were studied using a polarising microscope, cathodoluminescence and electron scanning microscopy. This study allowed us to make sure that the carbonate elements and structures that constitute the samples were at least partly incorporated into the intertidal zone. It also led us to perform  $^{14}\text{C}$  AMS dating on total samples: diagenetic cements seemed difficult to extract manually and the sources of carbonate pollution are limited in the basement context of the three islands.

The ages look coherent except for a few samples. The deepest samples are, in general, the oldest ones. Because each beach has a specific infratidal beachrock profile, the ages obtained are rather heterogeneous. Each beach has its own chronology revealing a specific evolution of its coastline. The rise of the relative sea level was uniform at the scale of the insular group of Mykonos-Delos-Rhenia. The effects of this evolution were appreciably different from one beach to another because of controls by local parameters (long-shore drift, exposure to the swells, sedimentary supply).

This study makes it possible to propose a curve of relative sea-level rise during the Holocene. This curve agrees rather

well with the Aegean sea-level changes proposed by N.C. Flemming *et al.* (1971) and with data obtained from archaeological indicators. We reconstitute a sea level at about  $-2.5$  m ( $\pm 0.5$  m) around 400 BC, which does not correspond to the model proposed by K. Lambeck and P. Johnston (1995).

## Introduction

Les variations des lignes de rivage des îles de Délos et de Rhénée, situées au centre des Cyclades (fig. 1), sont l'objet de nombreuses études depuis le début du  $\text{xx}^{\text{e}}$  siècle. Les premières hypothèses formulées par P. Negris (1903, 1904a et 1904b), à partir de l'observation des vestiges littoraux hellénistiques et romains, ont été vivement rejetées par L. Cayeux (1907, 1911 et 1914). P. Negris plaide pour une "transgression de la Méditerranée" (Negris, 1904b), alors que L. Cayeux défendait l'hypothèse d'une stabilité du niveau marin depuis l'Antiquité.

Aujourd'hui, archéologues et géographes s'accordent sur l'hypothèse de P. Negris. La submersion des vestiges archéologiques littoraux est causée par une hausse apparente du niveau marin de l'ordre de 2,50 m à 3 m depuis le  $\text{II}^{\text{e}}$  siècle av. J.-C. (Duchêne *et al.*, 2001). Tous les modèles littoraux témoignent d'une hausse relative du niveau marin. Il n'y a aucun dépôt holocène correspondant à un niveau marin supérieur au niveau actuel. Les falaises et pseudo-falaises de granite et de gneiss dominant, tandis que le fond des baies est occupé par des plages et des grèves riches en matériaux archéologiques remaniés. En outre, le contexte géologique régional de bassin d'extension d'arrière-arc, à l'origine d'un affaissement lent du plateau des Cyclades (Hejl *et al.*, 2002), ne s'oppose pas à la hausse eustatique globale du niveau de la mer.

La hausse relative du niveau marin au cours des six derniers millénaires dans l'ensemble des Cyclades (Flemming *et al.*, 1971) est indiscutable. En revanche, le rythme de cette évolution et le tracé des anciennes lignes de rivage ne sont pas connus précisément. N. C. Flemming *et al.* (1971) ont estimé entre 2,20 m et 2,80 m la hausse du niveau marin au cours des 2500 dernières années alors que, dans leur modèle, K. Lambeck et P. Johnston (1995) évaluent cette hausse à environ 1,50 m pour les 2000 dernières années. À l'échelle des îles de Délos et de Rhénée, l'utilisation des vestiges archéologiques comme marqueurs et comme dateurs des anciennes lignes de rivage est insuffisante. La fonction et la configuration originelles de ces structures ne sont pas toujours déterminées précisément. En outre, ces marqueurs concernent essentiellement les périodes hellénistiques et romaines et sont regroupés de part et d'autre du chenal de Délos (fig. 1). Il a donc semblé nécessaire de rechercher et d'étudier des marqueurs géomorphologiques susceptibles d'être datés à Délos, à Rhénée et à Mykonos. Les trois îles constituent un même ensemble géologique structuré par un pluton granitique miocène et par l'encaissant gneissique (Avigad *et al.*, 1998, fig. 1). Cet ensemble insulaire a connu une évolution tectonique différente de celle des îles voisines de Tinos, de Syros et de Naxos, structurées par d'autres plu-

tons (Gautier, 1995). Cette évolution est homogène à l'intérieur de l'ensemble Mykonos-Délos-Rhénée depuis le Pliocène. Les grandes failles subméridiennes à composante horizontale et/ou verticale qui traversent les trois îles ne seraient plus actives depuis le Pliocène (Avigad *et al.*, 1998 ; Hejl *et al.*, 2002 ; Sánchez-Gómez *et al.*, 2002), comme celles du domaine égéen (Gautier, 1995 ; Hatzfeld, 1999). Par ailleurs, aucune forme de néotectonique n'a été observée sur les trois îles.

Les seuls marqueurs géomorphologiques existant à Mykonos, à Délos et à Rhénée sont les *beachrocks* (grès de plage) : la plupart des baies de l'ensemble insulaire en sont ourlées (fig. 1). La disposition et la submersion systématique de ces *beachrocks* témoignent d'une hausse continue du niveau marin au cours de l'Holocène. Par leur grand nombre et leur étagement en profondeur, ces dalles, qui se forment à l'étage médiolittoral, offrent la possibilité de reconstituer la position de nombreuses plages fossiles.

Ainsi, les *beachrocks* peuvent aussi être utilisés pour dater la remontée relative du niveau marin. Ils recèlent des ciments précoces diagénétiques contemporains de leur formation dans l'étage médiolittoral. Cependant, comme les grès de plage contiennent généralement d'autres éléments

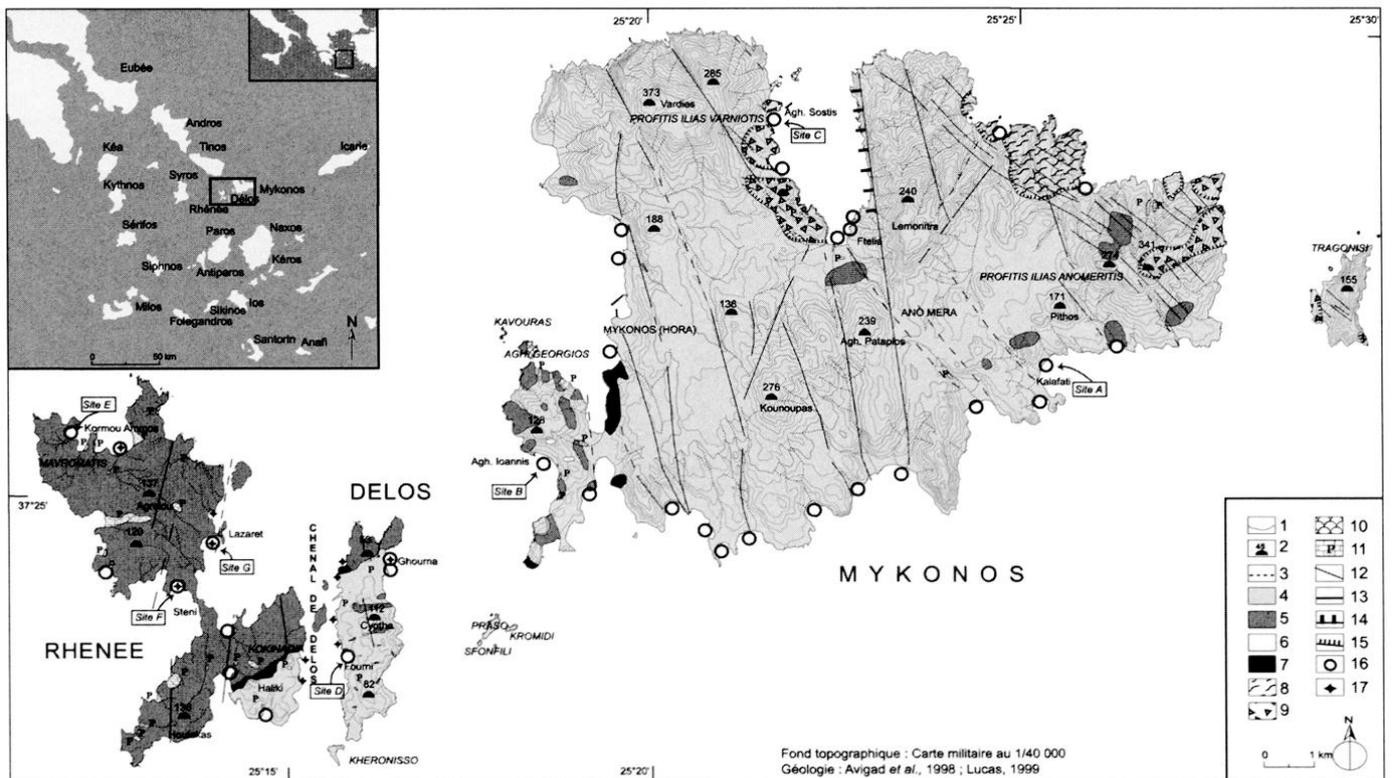
carbonatés, leur utilisation pour dater précisément ces étages médiolittoraux est souvent délicate (Pirazzoli, 2001). Dans le contexte cristallin de Mykonos-Délos-Rhénée, le sédiment de plage est essentiellement constitué de grains siliceux. Les sources de "pollution" carbonatée sont *a priori* limitées : elles peuvent provenir de l'érosion des molasses miocènes et de quelques placages de calcarénites, essentiellement des éolianites fini-pléistocènes situées à Rhénée et au nord de Mykonos (fig. 1). Cela nous a permis d'opter pour des datations au <sup>14</sup>C sur échantillon total, en ayant toutefois effectué auparavant un examen cimentologique sur lame mince. À partir de ces datations, nous proposons des hypothèses sur le rythme de la remontée relative du niveau marin depuis 6000 ans et sur les causes de cette évolution.

### Localisation et géométrie des *beachrocks* de l'ensemble Mykonos-Délos-Rhénée

Les *beachrocks* ont été identifiés à partir des critères géomorphologiques définis par R. Dalongeville et P. Sanlaville (1984) : "Le *beachrock*, qui présente le plus souvent une disposition en dalles inclinées vers la mer, est une formation

Fig. 1 – Géologie de l'ensemble Mykonos-Délos-Rhénée et localisation des marqueurs littoraux. 1 : courbes de niveau équidistantes de 20 m ; 2 : cotes d'altitude en m ; 3 : rivières, ruisseaux temporaires ; 4 : granites ; 5 : gneiss ; 6 : marbres ; 7 : micaschistes ; 8 : métavolcanites ; 9 : molasses miocènes ; 10 : carbonates permo-triasiques ; 11 : calcarénites ("poros") ; 12 : filons de barytine ; 13 : failles, fractures parfois masquées ; 14 : failles normales ; 15 : failles de détachement du dôme métamorphique ; 16 : *beachrocks*, cordons de galets cimentés ; 17 : vestiges archéologiques submergés.

Fig. 1 – Geological sketch of Mykonos-Delos-Rhenia showing the location of coastal indicators. 1: elevation contours, 20 m asl.; 2: spot height in m; 3: ephemeral flow; 4: granites; 5: gneiss; 6: marbles; 7: micaschists; 8: metavolcanics; 9: Miocene molasse; 10: Permo-triassic carbonates; 11: calcarenites ("poros"); 12: barite veins; 13: faults, joints and hidden faults, hidden joints; 14: normal faults; 15: low-angle normal faults; 16: beachrocks, cemented pebble bars; 17: submerged archaeological vestiges.



sédimentaire indurée sous l'effet d'une cimentation carbonatée initialement en aragonite ou en calcite magnésienne au niveau de l'étage médiolittoral. Il existe des *beachrocks* fossiles, situés à des altitudes supérieures ou au contraire inférieures au niveau actuel de la mer". Le pendage des dalles est conforme à la pente de la plage d'origine.

Les dalles de *beachrock* que l'on a observées à Mykonos, à Délos et à Rhénée se regroupent en deux ou trois alignements parallèles au rivage, séparés les uns des autres par des étendues sableuses (fig. 2 et 3). Le premier alignement est proche du rivage et peu profond, situé entre 0 m et 2,10 m de profondeur. Le second alignement est en position intermédiaire et est situé entre 1,10 m et 3,80 m de profondeur. Le troisième alignement, plus loin du rivage et plus rare, est entre 3,50 m et 3,70 m de profondeur. Leur distance par rapport au trait de côte actuel dépend de la pente infralittorale. Chaque baie se caractérise par une disposition des dalles de *beachrocks* particulière, en fonction de cette pente, du mode plus ou moins battu de la plage et de la dérive littorale. Ces dalles sont plus ou moins proches les unes des autres (comparer les fig. 3B et 3F<sub>1</sub>, par exemple).

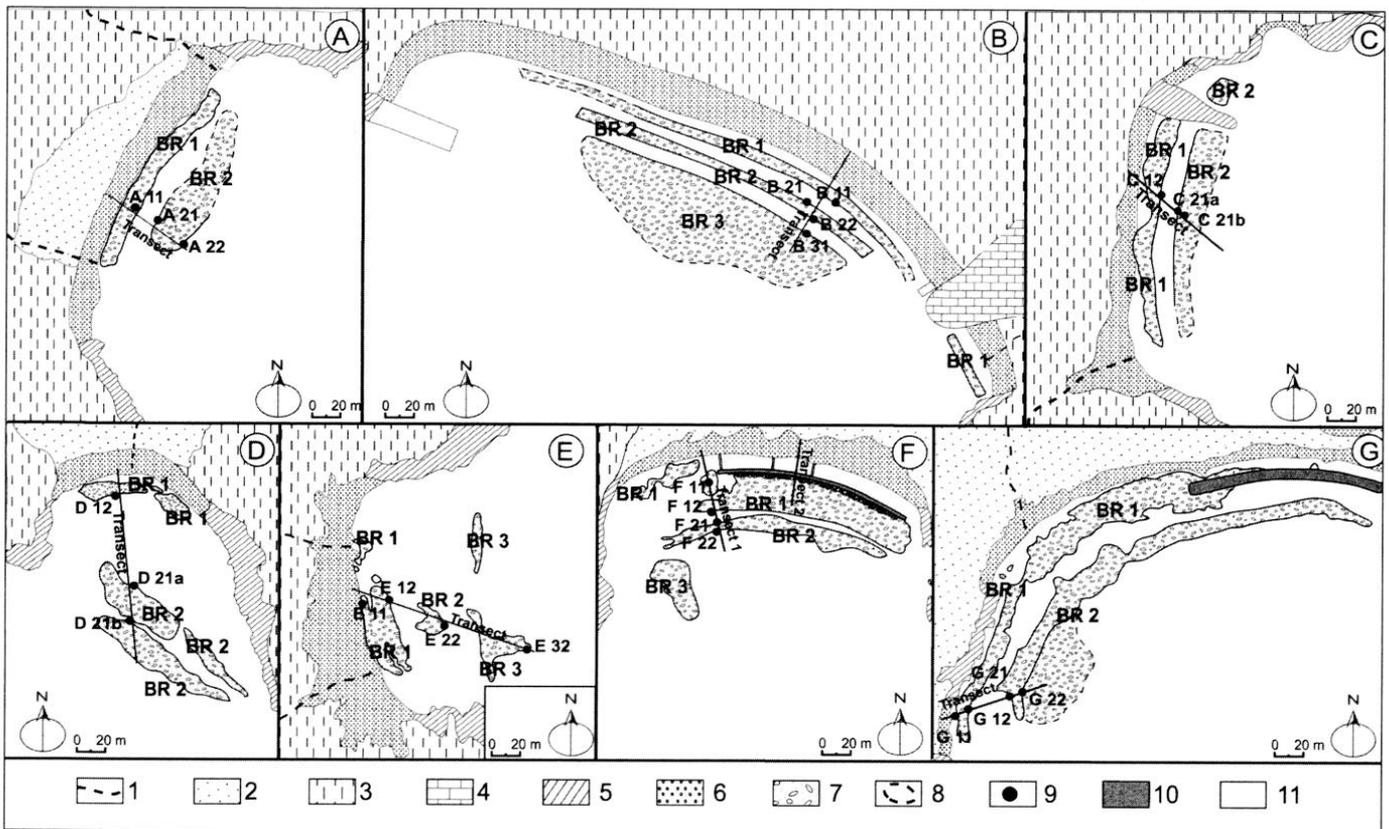
Les *beachrocks* sont issus de la cimentation, à faible profondeur (Purser, 1980), de plages actives. Pour que cette cimentation s'opère, il faut qu'un certain nombre de conditions soient réunies : grains immobilisés, perméabilité suffisante des sédiments, saturation permanente en carbonate de calcium. La genèse des *beachrocks* se fait en deux stades. Le premier est la cimentation, à faible profondeur, durant une phase progradante de la plage ou sous un film superficiel de cyanobactéries (Bernier et Dalongeville, 1988). Le second est la mise au jour des dalles qui s'effectue lors d'un recul de

la plage provoqué par l'érosion littorale (Dalongeville et Sanlaville, 1984 ; Bernier et Dalongeville, 1988 ; Neumeier, 1998). Les trois alignements visibles dans l'ensemble Mykonos-Délos-Rhénée suggèrent donc deux hypothèses : ces dalles sont issues d'une seule génération de *beachrock* morcelée ultérieurement par l'érosion en trois portions ; chacun de ces trois alignements s'est formé dans l'étage médiolittoral et il y aurait, à l'échelle de chaque plage, trois phases de stabilisation relative du niveau marin.

L'étude cimentologique sur lames minces permet de voir si chaque dalle s'est formée au moins en partie dans l'étage médiolittoral. Elle permet de vérifier que l'on date trois

Fig. 2 – Géomorphologie des sites étudiés. A : Kalafati (37°26'N ; 25°25'E) ; B : Aghios Ioannis (37°25'N ; 25°18'E) ; C : Aghios Sostis (37°29'N ; 25°21'E) ; D : Fourni (37°23'N ; 25°16'N) ; E : baie à l'ouest de Kormou Ammos (37°26'N ; 25°12'E) ; F : Steni (37°24'N ; 25°13'E) ; G : Lazaret (37°24'N ; 25°14'E). 1 : cours d'eau temporaire ; 2 : surface revêtue d'arène ; 3 : surface à couverture meuble discontinue ; 4 : calcarénites ; 5 : pseudo-falaise ; 6 : plage ; 7 : *beachrock* ; 8 : limites probables de *beachrock* ; 9 : site de prélèvement ; 10 : structure antique submergée ; 11 : aménagement récent.

Fig. 2 – *Geomorphology of the studied sites. A: Kalafati (37°26'N; 25°25'E); B: Aghios Ioannis (37°25'N; 25°18'E); C: Aghios Sostis (37°29'N; 25°21'E); D: Fourni (37°23'N; 25°16'N); E: bay in the west of Kormou Ammos (37°26'N; 25°12'E); F: Steni (37°24'N; 25°13'E); G: Lazaret (37°24'N; 25°14'E). 1: ephemeral flow; 2: surface covered with a thick coat of granitic sand; 3: surface covered by thin a discontinuous layer of superficial deposits; 4: calcarenites; 5: pseudo-cliff; 6: beach; 7: beachrock; 8: probable limits of beachrock; 9: location of sampling; 10: submerged ancient ruin; 11: recent installation.*



générations de beachrock et, par là-même, trois anciennes lignes de rivage.

### Étude cimentologique sur lame mince, des échantillons prélevés

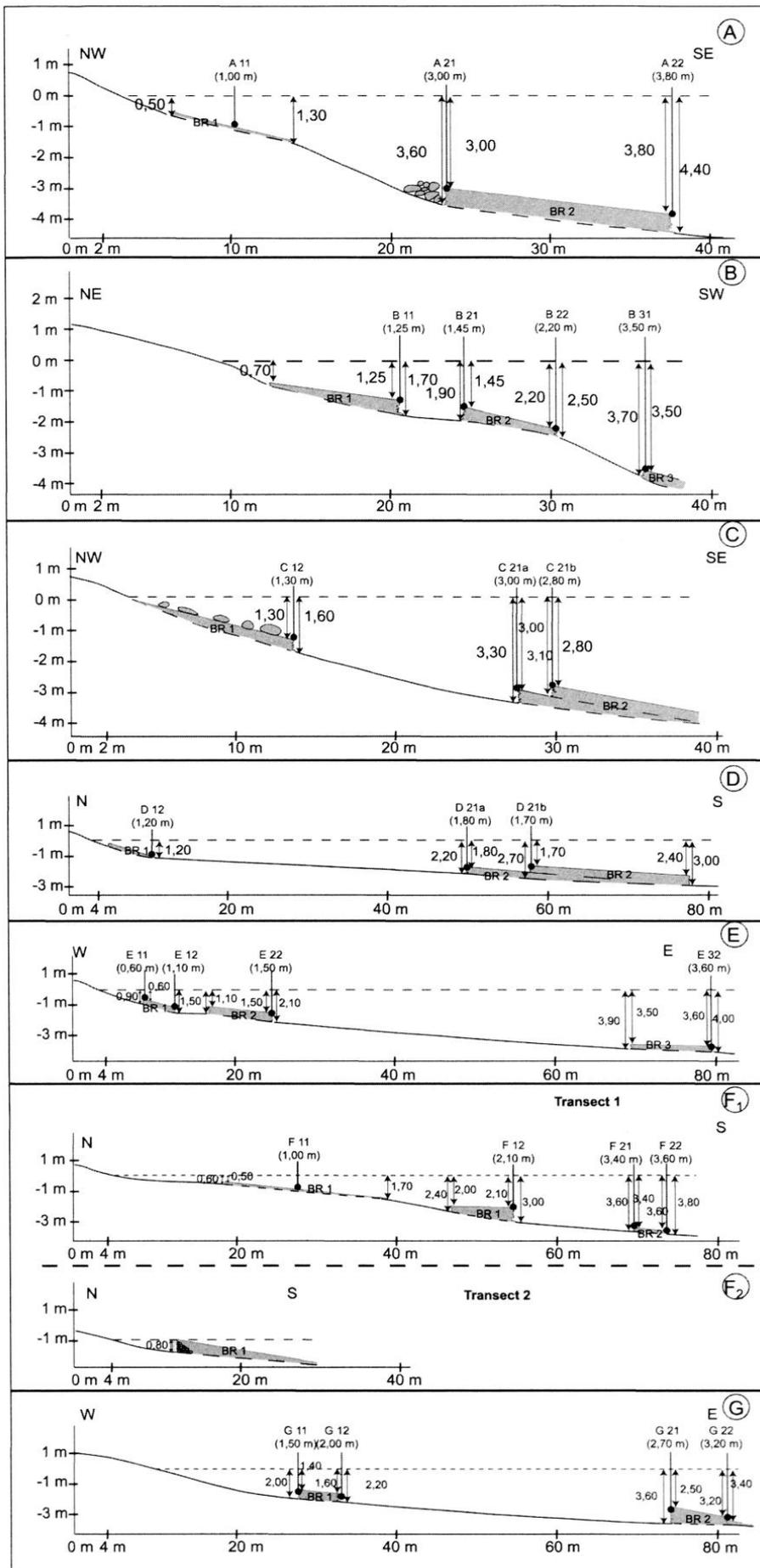
Les échantillons étudiés sur lame mince proviennent de sept baies situées sur les trois îles (fig. 1) : trois sont à Mykonos (sites A, B et C), une est à Délos (site D) et trois sont à Rhénée (sites E, F et G). Ces échantillons ont été prélevés "côté terre" et "côté mer" de chaque alignement de beachrock, légèrement sous la corniche sommitale des dalles (fig. 3). Un premier examen sous une loupe binoculaire a conduit à écarter une dizaine d'échantillons qui semblaient difficiles à dater. Les vingt échantillons restants, prélevés sur l'une ou l'autre face des beachrocks, ont été observés au microscope polarisant, au microscope électronique à balayage (MEB) et en cathodoluminescence.

Les échantillons de beachrocks de Mykonos, de Délos et de Rhénée sont essentiellement constitués de sables et de graviers provenant des sédiments de plage. Les grains de quartz, de mica et de feldspath dominant. Des minéraux lourds complètent la liste des éléments observés, ainsi que des bioclastes et des lithoclastes carbonatés. Ces derniers sont rares, même lorsque les affleurements carbonatés, de molasses et de calcarénites (notamment des éolianites), sont situés à proximité des sites étudiés. Cela est le cas des sites B (fig. 2B), C et E.

Les principaux types d'éléments et structures carbonatés observés entre les grains principalement siliceux sont les ciments diagénétiques, la calcite magnésienne péloïdale, la microsparite, les sédiments internes et la micrite

Fig. 3 – Profils des plages étudiées. A : Kalafati ; B : Aghios Ioannis ; C : Aghios Sostis ; D : Fourni ; E : baie à l'ouest de Kormou Ammos ; F<sub>1</sub> : Steni, transect 1 ; F<sub>2</sub> : Steni, transect 2 ; G : Lazaret.

Fig. 3 – Profiles of the studied beaches. A: Kalafati; B: Aghios Ioannis; C: Aghios Sostis; D: Fourni; E: Bay to the west of Kormou Ammos; F<sub>1</sub>: Steni, transect 1; F<sub>2</sub>: Steni, transect 2; G: Lazaret.



non diagénétique (fig. 4). Ces éléments et structures carbonatés sont, pour la plupart, contemporains de la formation des *beachrocks* dans l'étage médiolittoral.

Les ciments diagénétiques se caractérisent par une forte teneur en calcite magnésienne. Ces ciments *HMC* (*high magnesian calcite*) se sont formés alors que l'eau interstitielle (eau porale) était encore en connexion avec le réservoir marin ; leur genèse est donc contemporaine de celle du *beachrock*, à partir d'eau de mer ou d'eau légèrement sous-salée (Longman, 1980 ; Heckel, 1983 ; Aissaoui, 1986 ; Neumeier, 2000). Ils se présentent sous forme de franges isopaques, de quelques dizaines de micromètres d'épaisseur, qui enrobent les grains. Ces franges sont généralement de morphologies similaires à celles que D. M. Aissaoui (1986)

voir marin ; leur genèse est donc contemporaine de celle du *beachrock*, à partir d'eau de mer ou d'eau légèrement sous-salée (Longman, 1980 ; Heckel, 1983 ; Aissaoui, 1986 ; Neumeier, 2000). Ils se présentent sous forme de franges isopaques, de quelques dizaines de micromètres d'épaisseur, qui enrobent les grains. Ces franges sont généralement de morphologies similaires à celles que D. M. Aissaoui (1986)

Fig. 4 – **Éléments et structures carbonatés observés dans les échantillons.** 1 : petite frange isopaque de cristaux limpides non jointifs riches en calcite magnésienne ; 2 : petite frange isopaque de cristaux limpides et jointifs à texture palissadique riches en calcite magnésienne ; 3 : ciment isopaque de calcite radiaxiale fibreuse (*RFC*) riche en calcite magnésienne ; 4 : ciment micritique isopaque riche en calcite magnésienne ; 5 : micrite magnésienne péloïdale ; 6 : bioclastes ; 7 : dépôt géotrope de sédiments internes ; 8 : infiltration de micrite ; 9 : ciment de sparite précoce zonée ; 10 : cimentation marine de calcite magnésienne à la périphérie des pellets (liée vraisemblablement à des actions bactériennes) et/ou recristallisation.

Fig. 4 – **Carbonate fabrics observed in the samples.** 1: small isopachous fringe of limpid and non contiguous early-magnesian calcite crystals; 2: small bladed isopachous fringe of limpid and contiguous early-magnesian calcite crystals; 3: isopachous early-magnesian cement of radial fibrous calcite (*RFC*); 4: isopachous micritic cement; 5: peloidal high-magnesian calcite cement; 6: bioclasts; 7: geotrope deposit of internal sediments; 8: micrite infiltration; 9: early zoned spar cement; 10: marine cementation of magnesian calcite around pellets (probably caused by bacterial activity) and/or recrystallisation.

Éléments et structures carbonatés observés dans les <i>beachrocks</i> de Mykonos-Délos-Rhénée Carbonate elements and structures observed in the <i>beachrocks</i> of Mykonos-Delos-Rhenia			
	Code échantillon Sample's code	Bioclastes issus des sédiments de plage Bioclasts stem to beach sediment	Chronologie de l'intégration des structures carbonatées dans le <i>beachrock</i> Chronology of carbonate elements integration in the <i>beachrock</i>
Échantillons ne contenant que des structures carbonatées caractéristiques de l'étage médiolittoral Samples containing only carbonate structures characteristic of the intertidal zone	B 11		Pellet
	B 31		Pellet
	C 12		
Échantillons contenant des structures carbonatées caractéristiques de l'étage médiolittoral Samples containing carbonate structures characteristic of the intertidal zone	A 11		Pellet Pellet
	A 22		Pellet
	B 21		Pellet Pellet
	B 22		Pellet
	C 21a		Pellet Pellet
	C 21b		Pellet  Pellet
	D 21a		Pellet Pellet
	D 21b		Pellet
	E 11		Pellet Pellet
	E 22		Pellet Pellet
	E 32		Pellet Pellet
	F 11		Pellet Pellet
	F 12		Pellet Pellet
	F 21		Pellet
	G 12		Pellet   Pellet
G 22		Pellet   Pellet	
Échantillon ne contenant pas de structure carbonatée caractéristique de l'étage médiolittoral Sample containing no carbonate structure characteristic of the intertidal zone	D 12		

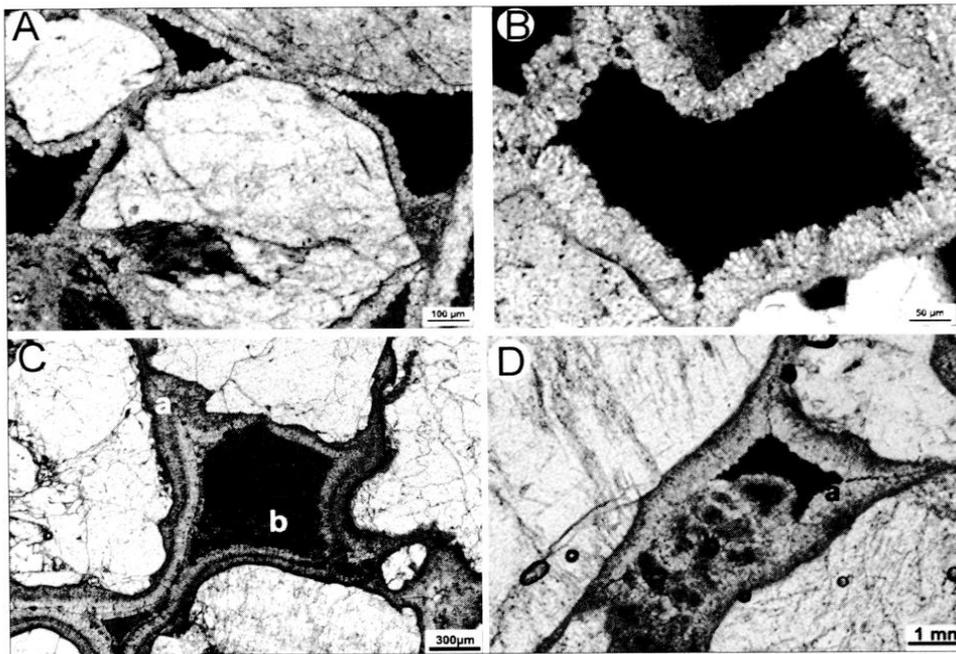


Photo 1 – Structures carbonatées, enrobant les silicocolastes (quartz, micas, feldspaths essentiellement), caractéristiques de l'étage médiolittoral. A : petite frange isopaque de cristaux limpides non jointifs (lame C 21a en lumière polarisée) ; B : petite frange isopaque de cristaux limpides et jointifs en "épée" (lame B 22 en lumière polarisée analysée) ; C : ciment isopaque de calcite radiaxiale fibreuse (a) et dépôt géotrope de sédiment interne à pellets (b, lame B 21, en lumière polarisée) ; D : ciment isopaque de calcite radiaxiale fibreuse (a) et micrite magnésienne péloïdale (b, lame B 21, en lumière polarisée).

Photo 1 – Carbonate structures surrounding siliciclasts (quartz, micas, feldspars essentially), characteristic of the intertidal zone. A: small isopachous fringe of transparent and no contiguous crystals (thin slide C 21a under polarised light); B: small isopachous fringe of transparent, blade-like and contiguous crystals (thin slide B 22, under polarised analysed light); C: isopachous cement of radial fibrous calcite (a) and geotropic deposit of internal sediment containing pellets (b, thin slide B 21, seen under polarised light); D: isopachous cement of radial fibrous calcite (a) and peloidal high-magnesian calcite cement (b, thin slide B 21, under polarised analysed light).

a identifiées : franges de cristaux limpides non jointifs (photo 1A), franges de cristaux limpides jointifs à texture palissadique (photo 1B), ciments plus épais de calcite radiaxiale fibreuse (RFC, photo 1C et 1D).

Dans deux échantillons, le ciment riche en calcite magnésienne prend un habitus micritique (fig. 4), de couleur marron, formant de fines franges isopaques (échantillon A11) ou constituant des amas et des ponts entre les grains (échantillon G12). Cette morphologie particulière en amas est probablement d'origine bactérienne (Bernier et Dalongeville, 1988 ; Neumeier, 1998).

Les dix-sept échantillons qui contiennent des ciments diagénétiques HMC palissadiques ou micritiques ont connu une évolution, au moins partielle, dans l'étage médiolittoral. Il en est de même des deux échantillons qui ne contiennent pas ce type de ciment mais où l'on a observé de la calcite magnésienne péloïdale. Le développement de calcite magnésienne péloïdale est fréquent dans les échantillons de beachrock (fig. 4). Il s'agit de micrite "colonisée" par des amas de pellets coalescents, de forme sphérique ou ovoïde (photo 1D). Les pellets sont des agglomérats de particules micritiques dont le diamètre varie entre 10 µm et 100 µm. Dans les beachrocks de l'ensemble Mykonos-Délos-Rhénée,

ces pellets semblent être issus du remaniement de micrite non indurée et d'une précipitation *in situ* de particules micritiques. Ce type de pellets est généralement associé à une précipitation de calcite magnésienne induite par des actions bactériennes (Chafetz, 1986 ; Kerans *et al.*, 1986 ; Meyers, 1987 ; Amieux *et al.*, 1989 ; Pickard, 1992 ; Strasser *et al.*, 1992) et par des circulations d'eau interstitielles liées aux marées et aux vagues (Neumeier, 1998). Ces pellets semblent résulter d'une phase diagénétique à l'intérieur des pores dans l'étage médiolittoral. Ainsi, la calcite magnésienne péloïdale peut être considérée comme un véritable ciment contribuant à la consolidation du beachrock (Neumeier, 1998). Cependant, la calcite magnésienne péloïdale est souvent "polluée" par des ciments tardifs. Il s'agit de fines ceintures radiales de cristaux microsparitiques à la périphérie des pellets (fig. 4). Leur luminescence orange témoigne d'une cimentation marine de calcite magnésienne liée vraisemblablement à des actions bactériennes et/ou à une recristallisation des pellets. La calcite magnésienne péloïdale

concernée par cette cimentation tardive ne s'est donc mise en place que partiellement dans l'étage médiolittoral.

Les sédiments internes et la micrite non diagénétique résultent d'infiltrations dans les pores des beachrocks néoformés. Les infiltrations de sédiments internes à intraclastes, généralement siliceux, et, dans une moindre mesure à bioclastes, sont contemporaines ou postérieures à la genèse des beachrocks dans l'étage médiolittoral. Ces dépôts géotropes se sont constitués par gravité dans les pores des beachrocks (photo 1C). Ils ont pu se mettre en place par la percolation en profondeur de particules fines en provenance de l'interface eau/sédiment. L'acheminement en profondeur des particules fines semble à la fois lié à leur densité et aux circulations hydrauliques internes provoquées notamment par les vagues et les mouvements de la nappe phréatique marine. Les sédiments internes peuvent contenir des éléments carbonatés susceptibles de "vieillir" la datation, mais leur mode de dépôt témoigne d'une mise en place dans l'étage médiolittoral.

Les micrites interstitielles non diagénétiques et parfois riches en bioclastes semblent s'être introduites plus tardivement dans les pores des beachrocks en milieu plus calme, dans l'étage infralittoral supérieur.

De toutes les structures carbonatées présentes dans les vingt échantillons de *beachrocks*, quatre sont caractéristiques d'une diagenèse ou d'un dépôt dans le médiolittoral : les ciments diagénétiques palissadiques, les ciments micritiques, la calcite magnésienne péloïdale et les sédiments internes. Seul l'échantillon D 11 prélevé à Fourni (Délos, fig. 1 et 3D) ne contient aucune de ces quatre structures. Il a été prélevé "côté mer" d'un *beachrock* très friable. Il est essentiellement constitué de bioclastes (fig. 4) faiblement cimentés par de la calcite peu magnésienne (*low magnesian calcite*) à luminescence orangée. Dans seize échantillons, les pores ont été comblés partiellement par des structures carbonatées issues en partie de l'étage médiolittoral. Dans trois échantillons, la totalité de ces éléments carbonatés a été incorporée dans le *beachrock* dans l'étage médiolittoral.

Les deux ou trois alignements sédimentaires submergés observés dans les baies de Mykonos, de Délos et de Rhénée ont été interprétés comme des *beachrocks* par leur morphologie et leur géométrie : ils suivent les isobathes, leur morpho-structure en dalles inclinées vers la mer est évidente et leur module de quelques mètres est similaire à celle des plages actuelles. Les analyses de laboratoire, notamment celles des habitus des ciments, confirment les conclusions de terrain : il s'agit bien de volumes sédimentaires médiolittoraux.

À partir du moment où les critères morphodynamiques et cimentologiques sont les mêmes pour les trois alignements, il ne peut s'agir d'un seul et même *beachrock* plus ou moins démantelé, car le développement transversal et altitudinal serait alors trop important en regard des conditions hydrodynamiques littorales qui prévalent dans ce secteur de la Méditerranée. Grâce à ces alignements de plages fossiles, nous sommes donc en mesure de reconstituer la position de trois étages médiolittoraux anciens dans chaque baie étudiée. Le marnage est faible dans ce secteur (0,20 m à 0,30 m), même si l'exposition est changeante et si les variations barométriques peuvent provoquer une ouverture locale plus importante du médiolittoral. L'extension horizontale et verticale des zones médiolittorales reconstituées et datées est donc relativement limitée.

## Les datations au $^{14}\text{C}$ des *beachrocks* de l'ensemble Mykonos-Délos-Rhénée

### Le choix de la méthode de datation

Lors de l'analyse des lames minces, nous avons constaté que, dans la plupart des échantillons, les ciments diagénétiques (enrobages de type *HMC* et calcite magnésienne péloïdale) étaient peu développés et imbriqués dans d'autres éléments carbonatés (micrite non cimentée, notamment). Nous savons que les datations au  $^{14}\text{C}$  sur ciment exclusivement sont les plus fiables, mais, étant donné ces observations sur lame mince, il est apparu techniquement trop difficile de séparer les ciments diagénétiques de leur support. Les datations des coquilles sont moins sûres que les datations des ciments. Dans le premier cas, les éléments du

dépôt sont datés alors que dans le second cas, la datation donne véritablement l'âge de la genèse du *beachrock*. *A priori*, les deux méthodes fournissent des résultats assez proches puisque la cimentation dont on parle est "précoce" et rapide.

Nous avons opté pour une troisième possibilité : les datations au  $^{14}\text{C}$  par méthode *AMS* (*accelerator mass spectrometry*) sur échantillon total, qui offrent des résultats acceptables si le *beachrock* ne contient pas trop d'éléments carbonatés autres que les ciments (Neumeier, 1998). Cette technique de datation est donc applicable en milieu cristallin, à condition de vérifier que les échantillons ne sont pas trop riches en bioclastes, en micrite non diagénétique ou en clastes carbonatés provenant par exemple de *beachrocks* remaniés. Ce travail a été réalisé lors d'une estimation volumique, sur lame mince, de la part de chaque type d'élément ou de structure carbonatés dans les échantillons de *beachrock*.

Les datations ont été calibrées par le Centre de datation par le radiocarbonate de Lyon au moyen de la courbe de M. Stuiver *et al.* (1998), en fonction des valeurs du rapport isotopique  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ . Celles-ci sont toujours proches de  $0 \pm 2\text{‰}$ , "fourchette" de valeurs caractéristiques des carbonates marins. Les effets du réservoir marin, évalués à Ftéla (Mykonos, fig. 1) par G. Facorellis et I. Maniatis (2002), n'induisent pas de différences importantes par rapport à la calibration des datations réalisée avec la courbe de M. Stuiver *et al.* (1998).

### Résultats des datations

En reportant les résultats (tab. 1) sur un graphique mettant en relation les âges calibrés des échantillons et les profondeurs des dalles de *beachrocks* où ils ont été prélevés, une tendance générale se dégage (fig. 5). Les dalles de *beachrocks* les plus profondes et les plus éloignées du rivage sont les plus anciennes.

Les datations tendent à se regrouper en trois ensembles de points correspondant aux trois alignements de *beachrocks* parallèles au rivage, repérés *in situ*. L'alignement le plus profond, de "dalles 3", est plus difficile à distinguer sur le graphique car nous ne disposons que de deux datations. La tendance générale évoquée ci-dessus se retrouve dans chacun des ensembles de points, au moins pour les "dalles 1" et les "dalles 2". Deux courbes de tendance, voire trois, peuvent être tracées (fig. 5). Les courbes de tendance permettent d'expliquer les écarts de datations importants entre des échantillons provenant de *beachrocks* de sites différents situés près du rivage ("dalles 1") ou entre des échantillons prélevés sur des "dalles 2". Les échantillons de "dalles 1" ont des âges qui s'échelonnent de 1950 ap. J.-C. à 550 ap. J.-C. Ceux des "dalles 2" ont des âges compris entre 750 ap. J.-C. et 1810 av. J.-C. Les deux échantillons prélevés sur des "dalles 3" datent respectivement de 1890 av. J.-C.-1720 av. J.-C. et 3320 av. J.-C.-3090 av. J.-C.

Les disparités chronologiques s'expliquent en grande partie, par la diversité des profondeurs des dalles de *beachrocks* étudiées. Quelques résultats s'écartent des courbes de ten-

Code échantillon	Code laboratoire	Profondeur de la dalle (cote supérieure "amont" - cote supérieure "aval")	Profondeur de l'échantillon	Datation <sup>14</sup> C BP	Âge calibré	Rapport isotopique <sup>13</sup> C/ <sup>12</sup> C
Sample's code	Laboratory code	Depth of beachrock (lower limit-upper limit)	Depth of sample	<sup>14</sup> C Yr BP	Calibrated age	δ <sup>13</sup> C
A11	Lyon-2050 (OxA)	0,5 m - 1,3 m	1 m	1330 ± 35	1010-1170 ap. J.-C.	+ 3,67 ‰
A 22	Lyon-2051 (OxA)	3 m - 3,8 m	3,8 m	3185 ± 45	1160-900 av. J.-C.	+ 3,70 ‰
B 11	Lyon-2052 (OxA)	0,7 m - 1,25 m	1,25 m	1775 ± 40	550-700 ap. J.-C.	+ 3,51 ‰
B 21	Lyon-2053 (OxA)	1,45 m - 2,2 m	1,45 m	2465 ± 45	310-40 av. J.-C.	+ 3,15 ‰
B 22	Lyon-2058 (OxA)	1,45 m - 2,2 m	2,2 m	2265 ± 30	1-160 ap. J.-C.	+ 2,76 ‰
B 31	Lyon-2059 (OxA)	3,5 m - 3,7 m	3,5 m	4860 ± 35	3320-3090 av. J.-C.	+ 3,42 ‰
C 12	Lyon-2074 (Poz)	0 m - 1,3 m	1,3 m	970 ± 35	1330-1440 ap. J.-C.	+ 3,35 ‰
C 21a	Lyon-2075 (Poz)	2,8 m - 3,3 m	3 m	1750 ± 25	605-700 ap. J.-C.	+ 3,06 ‰
C 21b	Lyon-2076 (Poz)	2,8 m - 3,3 m	2,8 m	3745 ± 30	1810-1620 av. J.-C.	+ 2,72 ‰
D 11	Lyon-2079 (Poz)	0 m - 1,2 m	1,2 m	440 ± 25		+ 2,33 ‰
D 21a	Lyon-2080 (Poz)	1,7 m - 2,4 m	1,8 m	1700 ± 30	645-750 ap. J.-C.	+ 2,91 ‰
D 21b	Lyon-2081 (Poz)	1,7 m - 2,4 m	1,7 m	2545 ± 25	350-190 av. J.-C.	+ 1,71 ‰
E 11	Lyon-2082 (Poz)	0,6 m - 1,1 m	0,6 m	1300 ± 25	1040-1170 ap. J.-C.	+ 2,80 ‰
E 22	Lyon-2083 (Poz)	1,1 m - 1,5 m	1,5 m	2175 ± 30	110-260 ap. J.-C.	+ 3,02 ‰
E 32	Lyon-2084 (Poz)	3,5 m - 3,6 m	3,6 m	3815 ± 30	1890-1720 av. J.-C.	+ 2,65 ‰
F 11	Lyon-2085 (Poz)	0,5 m - 1,7 m	1 m	1610 ± 30	750-850 ap. J.-C.	+ 3,20 ‰
F 12	Lyon-2086 (Poz)	2 m - 2,1 m	2,1 m	1380 ± 30	975-1075 ap. J.-C.	+ 2,82 ‰
F 21	Lyon-2087 (Poz)	3,4 m - 3,6 m	3,4 m	2595 ± 30	390-230 av. J.-C.	+ 2,94 ‰
G 12	Lyon-2088 (Poz)	1,4 m - 1,6 m	2 m	1635 ± 25	690-810 ap. J.-C.	+ 4,77 ‰
G 22	Lyon-2089 (Poz)	2,6 m - 3,2 m	3,2 m	2775 ± 30	700-410 av. J.-C.	+ 1,66 ‰

dance datations/profondeur. Ces "anomalies" semblent être causées par des perturbations du transit sédimentaire dans le cas du site F (Steni à Rhénée, fig. 1 et 2F) et par les constitutions minéralogiques des échantillons.

Les échantillons F 12 et F 21 sont trop récents par rapport aux échantillons prélevés dans d'autres sites sur des beachrocks de même profondeur. La baie de Steni est "barrée"

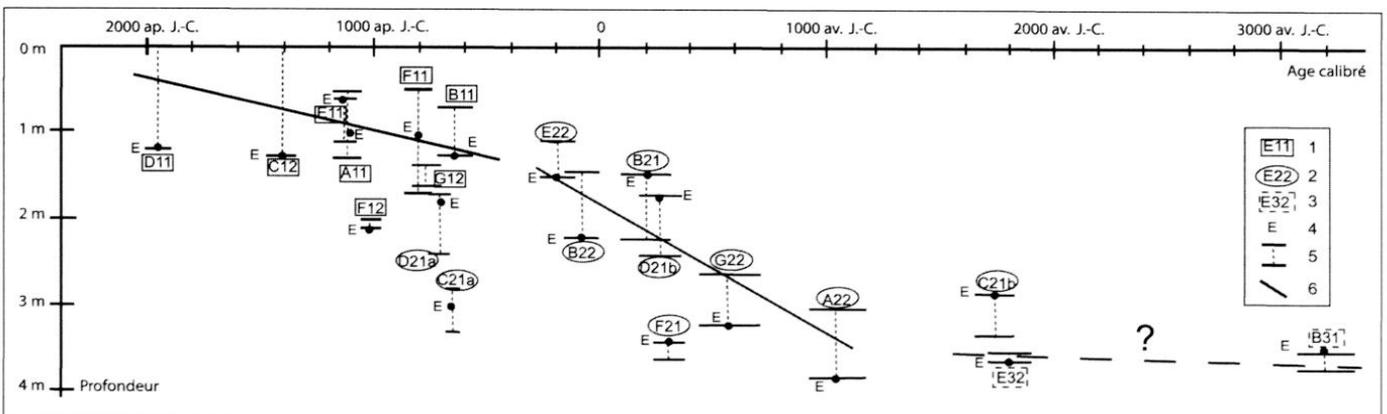
Tableau 1 – Datations sur échantillon total au <sup>14</sup>C par méthode AMS.

Table 1 – Dating carried out in a total sample using the <sup>14</sup>C AMS method.

par un mur antique (Charre et Couilloud-Le Dinahet, 1999) parallèle au rivage, de 0,80 m de hauteur. Ce mur a proba-

Fig. 5 – Graphique datations/profondeurs des échantillons de beachrock. 1 : échantillon prélevé sur une "dalle 1" ; 2 : échantillon prélevé sur une "dalle 2" ; 3 : échantillon prélevé sur une "dalle 3" ; 4 : profondeur du prélèvement de l'échantillon sur la dalle ; 5 : profondeur de la dalle (trait vertical) et fourchette de datation obtenue après calibration du résultat obtenu par méthode AMS (trait horizontal) ; 6 : courbe de tendance.

Fig. 5 – Age–depth graph of beachrock samples. 1: sample in "bench 1"; 2: sample in "bench 2"; 3: sample in "bench 3"; 4: depth of sample in the bench; 5: depth of beachrock (vertical line) and calibrated age (horizontal line); 6: trend line.



blement perturbé le transit sédimentaire de la plage et, par conséquent, la genèse des *beachrocks* dans cette baie. La "dalle 2" date de l'époque hellénistique et semble contemporaine du mur décrit plus haut, qui a probablement limité le flux sédimentaire provenant du cordon de plage de l'époque. Ce déficit d'apport sédimentaire explique probablement la formation "tardive" de ce *beachrock* situé entre 3,40 m et 3,60 m de profondeur.

L'échantillon C 21b, trop ancien par rapport à sa profondeur, contient de la micrite non diagénétique et des intraclastes carbonatés dans les sédiments internes qui tendent probablement à vieillir les datations.

La différence chronologique (plus de 1500 ans d'écart) entre les deux échantillons prélevés sur des "dalles 3" situées à des profondeurs similaires (entre 3,50 m et 3,70 m) est certainement due à la pétrographie des échantillons. L'échantillon E 32 contient de la calcite magnésienne péloïdale recristallisée (10% de la fraction carbonatée) qui rajeunit probablement la datation. La différence peut surtout être provoquée par la forte proportion de sédiments internes (environ 80 % de la fraction carbonatée), qui risquent de "vieillir" la datation. Ces sédiments internes contiennent de la micrite et quelques intraclastes carbonatés provenant probablement de l'érosion des calcarénites situées dans la baie (fig. 2B).

L'âge trop "récent" des échantillons C 21a et D 21a peut provenir de la nature des éléments et des structures carbonatés observés dans les échantillons. Ils contiennent beaucoup de sédiments internes, dont la micrite et les intraclastes peuvent "polluer" la datation. Cependant, nous ne pouvons pas affirmer avec certitude que ces éléments "rajeunissent" la datation. La géométrie particulière des dalles dont sont issus les échantillons est peut-être aussi en cause. Dans ces deux cas, l'échantillon a été prélevé sur une dalle de *beachrock* recouvert partiellement par une autre dalle (fig. 2C et 2D).

Les trois alignements de *beachrocks* observés *in situ* se traduisent par la présence de trois ensembles de points sur notre graphique datation/profondeur. Cependant, la chronologie n'est pas homogène à l'échelle de l'ensemble Mykonos-Délos-Rhénée. Par exemple, les "dalles 2" ne se sont pas toutes formées en même temps et à la même profondeur (comparer les échantillons E 22 et A 22). Les différences chronologiques entre les sites semblent liées à la diversité des profils de dalles de chaque baie.

## Discussion

La pente des courbes de tendance datation/profondeur donne l'impression d'une remontée lente, de l'ordre de 9 mm/siècle en moyenne, du niveau marin apparent dans l'ensemble Mykonos-Délos-Rhénée au cours des six derniers millénaires. Cependant, le profil des dalles au sein de chaque baie ne semble pas compatible avec une telle hausse continue du niveau marin relatif. Pour qu'un *beachrock* compte plusieurs dalles, il faut qu'il dispose d'un certain volume et d'une certaine largeur de sédiments de plage, ce qui ne peut lui être offert que par une plage progradante. Le scénario idéal est celui de périodes assez longues (plusieurs

décennies ? plusieurs siècles ?) de stabilisation de la ligne de rivage séparées par des périodes de transition rapides. Dans une dynamique de transgression trop rapide, la mer est conduite à remanier ses propres sédiments et à les recouvrir en les maintenant dans un milieu infralittoral marin. Cela ne peut aboutir à des séquences de dalles, dont les ciments montrent leur appartenance au domaine médiolittoral, disposées en tuiles inclinées vers la mer et séparées par des étendues sableuses, ce qui est le cas dans l'ensemble Mykonos-Délos-Rhénée. Les profils de dalles observés dans chaque baie et les datations obtenues ne peuvent donc pas être expliqués en prenant en compte uniquement l'évolution relative du niveau marin, qu'elle soit d'origine eustatique, glacio-hydro-isostatique ou tectonique.

Des paramètres locaux semblent avoir joué un rôle important dans la genèse des *beachrocks*. D'une part, les volumes des apports sédimentaires fournis par les cours d'eau temporaires, le colluvionnement et l'érosion des fausses falaises doivent être pris en compte. *A priori*, ces volumes sont restreints dans ces îles de quelques hectares de superficie (86 km<sup>2</sup> au plus). L'altération physico-chimique paraît limitée au cours de l'Holocène mais l'abandon de terrasses de culture à la fin de l'époque hellénistique, qui s'est produit dans de nombreux secteurs du pourtour méditerranéen, a peut-être provoqué une augmentation du volume de ces apports, notamment à Délos et à Rhénée. Nous avons par exemple observé une coulée de débris en bas d'un versant à terrasses abandonnées, au sud de la baie de Kormou Ammos à Rhénée (fig. 1). Cet apport a peut-être favorisé la gestation des dalles de *beachrocks* les plus proches du rivage actuel.

Par ailleurs, la géométrie des *beachrocks* au sein de chaque baie varie en fonction de la direction de la dérive littorale. Dans le site E (fig. 2E et 3E), par exemple, les *beachrocks* sont plus longs, plus pentus et presque coalescents au sud, où les relevés ont été effectués, alors qu'au nord, ils sont moins développés. Cette géométrie s'explique par la présence d'une dérive littorale de direction nord-sud qui favorise l'accumulation en direction du sud du stock sédimentaire fourni par l'érosion littorale et par le cours d'eau temporaire.

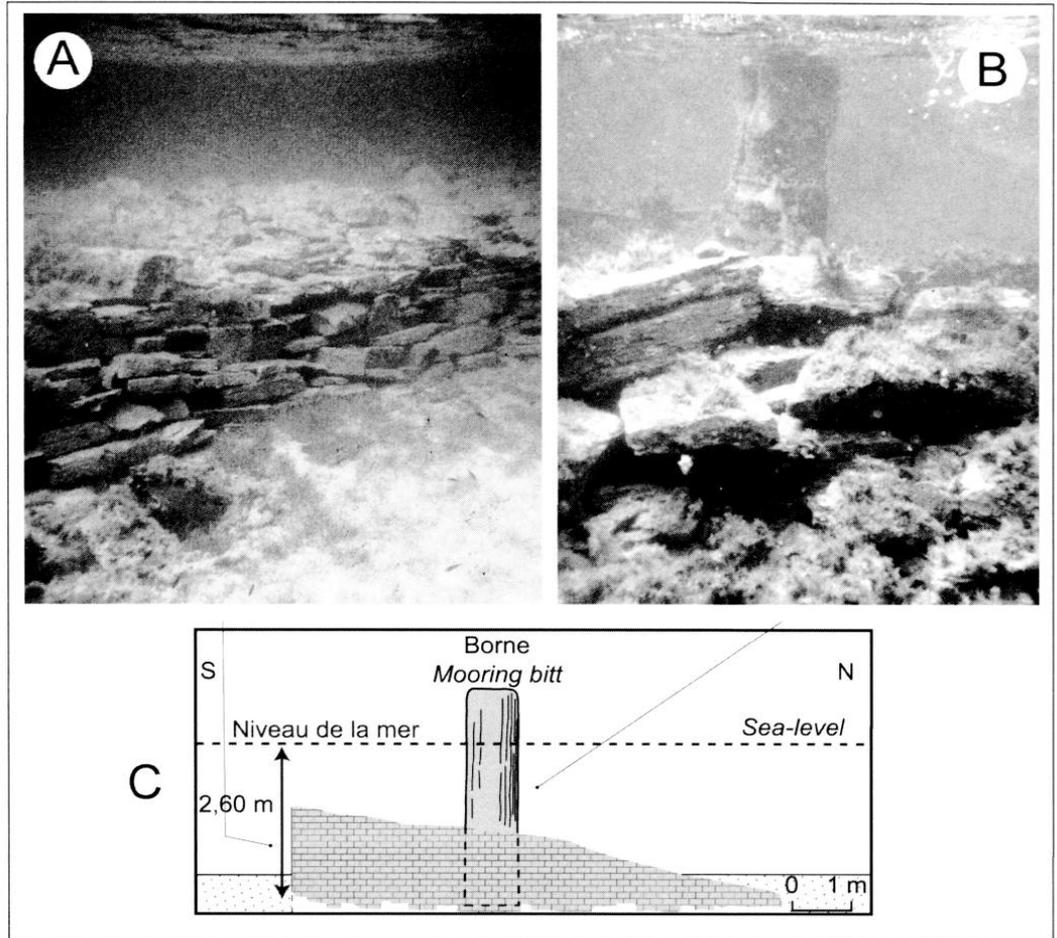
La profondeur et la géométrie des dalles de *beachrocks* qui accompagne l'évolution du niveau marin relatif identique à l'échelle de l'ensemble insulaire Mykonos-Délos-Rhénée, varient selon les paramètres locaux que nous venons de présenter. Par exemple, les *beachrocks* des sites A et C ont des pentes et des profondeurs similaires (fig. 3A et 3C). Leur différence d'âge (fig. 5) semble liée aux datations "marginales" des échantillons C 21a et C 21b, prélevés sur les "dalles 2" superposées du site C, car ces deux baies connaissent la même exposition aux houles et une dérive littorale venant du nord (fig. 2A et 2C).

Les sites D, F et G sont exposés au sud, mais les profils de *beachrocks* sont différents (fig. 3D, 3F, et 3G). Cela est probablement dû à la présence de vestiges archéologiques submergés dans les baies F (Steni à Rhénée, fig. 2F) et G (Lazaret à Rhénée, fig. 2G) qui perturbent le transit sédimentaire.

Les sites B et E n'ont pas la même exposition aux houles dominantes. Le site B est exposé à des houles du sud assez

Fig. 6 – Au sud du Lazaret (Rhénée), môle romain identifié par P. Negris (1904a). A : môle vu du sud en septembre 2002 ; B : borne vue du nord en septembre 2002 ; C : profil dressé par P. Negris (1904a), modifié.

Fig. 6 – South of Lazaret (Rhenia), roman pier identified by P. Negris (1904a). A: jetty seen from the south in September 2002; B: mooring bitt seen from the north in September 2002; C: plotting made by P. Negris (1904a), modified.



fréquentes, alors que le site E est relativement protégé des houles du nord, plus fréquentes que celles de secteur sud, par un promontoire rocheux au nord de la baie. Cela explique la pente infralittorale plus douce et l'inclinaison un peu plus faible de la "dalle 2" et de la "dalle 3" du site E (fig. 3E). Néanmoins,

entre les "dalles 2" et les "dalles 1", les profils des deux plages et des *beachrocks* sont presque similaires. Les datations obtenues sont relativement proches (fig. 5).

Il semble donc que la stabilisation relative du niveau marin, ou au moins le ralentissement de la remontée holocène de ce niveau, nécessaire à la gestation des *beachrocks* soit liée à la conjonction d'une dynamique à l'échelle "insulaire", celle de l'ensemble Mykonos-Délos-Rhénée, et de paramètres locaux. L'ensemble des datations au <sup>14</sup>C semble montrer une remontée lente et relativement régulière du niveau marin d'échelle "insulaire". La disposition des dalles au sein de chaque baie et les profils des pentes infralittorales indiquent des modifications spatio-temporelles locales des expositions aux houles dominantes, des volumes et de la redistribution des apports sédimentaires. Ces dynamiques locales ont pu favoriser l'alternance de phases de stabilisation et de phases d'érosion des lignes de rivage au sein de chaque baie, au cours d'une remontée lente du niveau marin dans l'ensemble Mykonos-Délos-Rhénée. À partir des datations obtenues, nous pouvons donc proposer une courbe assez précise de remontée du niveau marin relatif dans l'ensemble Mykonos-Délos-Rhénée. Trois jalons chronologiques peuvent être extraits de cette courbe : le niveau marin relatif était à -3,60 m ( $\pm 0,50$  m) vers 2000 av. J.-C., à -2,50 m ( $\pm 0,50$  m) vers 400 av. J.-C. et à -1 m ( $\pm 0,50$  m) vers 1000 ap. J.-C.

Les niveaux marins que nous reconstituons à partir de cette courbe correspondent bien aux hypothèses de N. C.

Flemming *et al.* (1971) qui proposent une hausse de 2,50 m à 3 m au cours de ces 2500 dernières années. En revanche, nos résultats diffèrent très sensiblement des estimations données par K. Lambeck et P. Johnston (1995). Leur modèle estime une élévation relative du niveau marin un peu plus faible, d'environ 1,50 m au cours de ces deux derniers millénaires. Ce modèle ne prend en compte que les effets du glacio-hydro-isostatisme. La différence entre les deux estimations est peut-être liée au fait que l'affaissement très lent des Cyclades (Hejl *et al.*, 2002), dans le bassin d'extension arrière arc égéen, n'est pas pris en compte dans le modèle de K. Lambeck et P. Johnston (1995).

Cette courbe de remontée du niveau marin est aussi en accord avec les indications fournies par l'étude des vestiges hellénistiques et romains submergés de part et d'autre du chenal de Délos. Par exemple, en contrebas des maisons de fouilles de Délos, on observe un replat où abondent des structures archéologiques liées à des habitations du II<sup>e</sup> siècle av. J.-C., dont un sol de maison à mosaïques situé à -1,33 m sous le niveau marin actuel (Duchêne *et al.*, 2001). L'étude des *beachrocks* permet de reconstituer un niveau marin à environ -2,50 m vers 400 av. J.-C., ce qui place le sol de cette maison à plus d'un mètre au-dessus du niveau marin.

À Rhénée, au sud du Lazaret (site G, fig. 2G, 3G et 6), il y a un quai romain (Negris, 1904b) dont la base est au moins à -2,60 m. Le Lazaret est une zone protégée des grandes houles, si bien que la faible lame d'eau marine que nous reconstituons à sa base, à partir de l'étude des *beachrocks*, pouvait suffire.

De plus, cette base était peut-être plus profonde, car elle est aujourd'hui partiellement enfouie dans le sable.

## Conclusion

Les trois alignements de *beachrocks* submergés que l'on observe dans l'ensemble Mykonos-Délos-Rhénée résultent d'une remontée lente du niveau marin relatif au cours de l'Holocène. L'étude géomorphologique puis l'analyse cimentologique ont permis de les interpréter comme trois anciens étages médiolittoraux, issus de trois phases de stabilisation de la ligne de rivage. Cependant, d'une plage à l'autre, ces *beachrocks* ne sont pas aux mêmes profondeurs, aux mêmes distances du rivage et n'ont pas le même profil. Ces différences d'ordre topographique et géométrique expliquent très souvent les écarts chronologiques que nous ont fournis les datations au  $^{14}\text{C}$  par méthode AMS. Chaque plage a connu une évolution, une succession de phases de progradation et d'érosion particulières. Ces évolutions locales, liées au volume des apports sédimentaires et aux conditions hydrodynamiques, semblent être à l'origine de la diversité des profils observés alors que la remontée du niveau marin relatif a été uniforme à l'échelle des trois îles. D'après les datations obtenues, cette hausse a été continue, mais on ne peut pas exclure qu'elle ait connu des phases de ralentissement et d'accélération.

Les datations au  $^{14}\text{C}$  sur échantillon total des *beachrocks* de Mykonos-Délos-Rhénée paraissent, à quelques exceptions près, cohérentes. Le contexte cristallin et la multiplication des datations ont permis de choisir cette méthode et, à partir des résultats obtenus, de proposer une courbe de remontée du niveau marin relatif assez précise. La fourchette altitudinale et horizontale des lignes de rivage reconstituées aurait été plus réduite si nous avions pu déterminer l'environnement diagénétique précis (vadose ou phréatique, marin ou météorique) des portions de dalles de *beachrocks* où les échantillons ont été prélevés. L'analyse des lames minces au microscope polarisant et en cathodoluminescence n'a pas permis d'identifier les morphologies cimentologiques caractéristiques de ces environnements. Pour y parvenir, nous pouvons envisager de réaliser des mesures du  $\delta^{18}\text{O}$ .

La courbe de remontée du niveau marin relatif que nous proposons pourra être comparée à celles qui seront obtenues à partir d'études des évolutions d'autres littoraux de la mer Égée. La multiplication de ces recherches permettra d'estimer plus précisément les parts de l'eustatisme et du glacio-hydroisostatisme dans l'évolution des littoraux du domaine égéen.

## Remerciements

Cette étude a bénéficié du soutien financier et matériel de l'École Française d'Athènes et a été intégrée au programme "L'eau à Délos" dirigé par Michèle Brunet.

## Références

Aissaoui D.M. (1986) – *Diagenèse carbonatée en domaine récifal*. Thèse de doctorat d'État, université Paris XI-Orsay, 369 p.

- Amieux P., Bernier P., Dalongeville R., Medwecki (de) V. (1989) – Cathodoluminescence of carbonate-cemented Holocene *beachrock* from the Togo coastline (West Africa): an approach to early diagenesis. *Sedimentary Geology*, 65, 261-272.
- Avigad D., Baer G., Heimann A. (1998) – Block rotations and continental extension in the central Aegean Sea : palaeomagnetic and structural evidence from Tinos and Mykonos (Cyclades, Greece). *Earth and planetary sciences letters*, 157, 1-2, 23-40.
- Bernier P., Dalongeville R. (1988) – Incidence de l'activité biologique sur la cimentation des sédiments littoraux actuels. L'exemple des îles de Délos et de Rhénée (Cyclades, Grèce). *Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Paris, série II*, 307, 1901-1907.
- Cayeux L. (1907) – Fixité du niveau de la Méditerranée à l'Époque historique. *Annales de Géographie*, 16, 107-109.
- Cayeux L. (1911) – *Description physique de Délos*. Exploration archéologique de Délos IV, Athènes-Paris, 215 p.
- Cayeux L. (1914) – Les déplacements de la mer à l'époque historique. *Revue scientifique*, 19, 577-586.
- Chafetz H.S. (1986) – Marine peloids: a product of bacterially induced precipitation of calcite. *Journal of Sedimentary Petrology*, 56, 812-817.
- Charre R., Couilloud-Le Dinahet M.T. (1999) – Sites de fermes à Rhénée. In Brunet M. (Éd.) : *Territoires des cités grecques*. Actes de la table ronde internationale organisée par l'EFA, 31/10/91-3/11/91. Bulletin de Correspondance Hellénique suppl. 34, Paris, p.150
- Dalongeville R., Sanlaville P. (1984) – Essai de synthèse sur le beach-rock. In actes du colloque "Le beach-rock", Maison de l'Orient, Lyon 1983. Travaux de la Maison de l'Orient, 8, Lyon, 161-167.
- Duchêne H., Fraisse P., Dalongeville R., Bernier P. (2001) – *Les paysages portuaires de la Délos antique : recherches sur les installations maritimes, commerciales et urbaines du littoral délien*. Exploration archéologique de Délos XXXIX, Athènes-Paris, 192 p.
- Facorellis G., Maniatis I. (2002) – Radiocarbon dating of the neolithic settlement of Ftelia on Mykonos: calculation of the marine reservoir effect in the Cyclades. In Sampson A. (Ed.): *The neolithic settlement at Ftelia, Mykonos*. Publication of the University of the Aegean, Rhodes, 309-315.
- Flemming N.C., Czartoryska N.M.G., Hunter P.M. (1971) – Archaeological evidence for eustatic and tectonic components of relative sea-level change in the South Aegean. *Marine Archaeology*, 23, 1-66.
- Gautier P. (1995) – *Géométrie crustale et cinématique de l'extension tardi-orogénique dans le domaine centre-égéen (îles des Cyclades et d'Eubée, Grèce)*. Thèse de doctorat, université Rennes I. Mémoires de géosciences, 61, Rennes, 417 p.
- Hatzfeld D. (1999) – The present-day tectonics of the Aegean as deduced from seismicity. In Durand B., Jolivet L., Horvath F., Seranne M. (Eds.): *The Mediterranean basins, Tertiary extension within the Alpine Orogen*. Geological Society of London, Special Publications, 156, 415-426.
- Heckel P.H. (1983) – Diagenetic model for carbonates rocks in Midcontinent Pennsylvanian eustatic cyclothem. *Journal of Sedimentary Petrology*, 53, 3, 733-759.

- Hejl E., Riedl H., Weintgartner H. (2002)** – Post-plutonic unroofing and morphogenesis of the Attic-Cycladic complex (Aegea, Greece). *Tectonophysics*, 349, 37-56.
- Kerans C., Hurley N.F., Playford P.E. (1986)** – Marine diagenesis in Devonian reef complexes of the Canning Basin, Western Australia. In Schroeder J.H., Purser B.H. (Eds.): *Reef Diagenesis*. Springer-Verlag, Berlin, 357-380.
- Lambeck K., Johnston P. (1995)** – Land subsidence and sea-level change: contributions from the melting of the last great ice sheets and the isostatic adjustment of the Earth. In Barends F.J., Brower F.J.J., Schroeder F.H. (Eds): *Land Subsidence Proc. Fifth Int. Symp. on Land Subsidence*, The Hague, 16-20 Oct 1995. Balkema, Rotterdam, 3-18.
- Longman M.W. (1980)** – Carbonate diagenetic textures from nearsurface diagenetic environments. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologist*, 64, 461-487.
- Lucas I. (1999)** – *Le pluton de Mykonos-Délos-Rhénée (Cyclades, Grèce) : un exemple de mise en place synchrone de l'extension crustale*. Thèse de doctorat, université d'Orléans, 491 p.
- Meyers J.H. (1987)** – Marine vadose cementation by cryptocrystalline magnesian calcite: Maui, Hawaii. *Journal of Sedimentary Petrology*, 57, 558-570.
- Negris P. (1903)** – Régression et transgression de la mer depuis l'époque glaciaire jusqu'à nos jours. *Revue Universitaire des Mines*, 3, 249-281.
- Negris P. (1904a)** – Vestiges archéologiques submergés. *Mitteilungen des Deutschen Archäologischen Instituts*, 29, 340-363.
- Negris P. (1904b)** – Nouvelles observations sur la dernière transgression de la Méditerranée. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, II, 379-381.
- Neumeier U. (1998)** – *Le rôle de l'activité microbienne lors de la cimentation précoce des beachrocks (dépôts marins littoraux)*. Thèse de doctorat, université de Genève, Suisse, 152 p.
- Neumeier U. (2000)** – Les variations holocènes du niveau marin mises en évidence par les caractères et la diagenèse des beachrocks : exemple de Damnoni (Crète). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4, 211-220.
- Pickard N.A.H. (1992)** – Depositional controls on Lower Carboniferous microbial buildups, eastern Midland Valley of Scotland. *Sedimentology*, 39, 6, 1081-1100.
- Pirazzoli P.A. (2001)** – De l'interprétation de la cimentation dans un beachrock. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4, 295.
- Purser B.H. (1980)** – *Sédimentation et diagenèse des carbonates néritiques récents*, tome 1. Éditions Technip, Paris, 366 p.
- Sánchez-Gómez M., Avigad D., Heimann A. (2002)** – Geochronology of clasts in allochthonous Miocene sedimentary sequences on Mykonos and Paros Islands: implications for back-arc extension in the Aegean Sea. *Journal of the Geological Society*, 159, 45-60.
- Strasser A., Strohmenger C., Davaud E., Bach A. (1992)** – Sequential evolution and diagenesis of Pleistocene coral reefs (South Sinai, Egypt). *Sedimentary Geology*, 78, 1-2, 59-79.
- Stuiver R.M., Reimer P.J., Bard E., Beck J.W., Burr G.S., Hughen K.A., Kromer B., Mc Cormac G., Van Der Plicht J., Spurk M. (1998)** – INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24,000-0 cal BP. *Radiocarbon*, 40, 3, 1041-1083.

Article reçu le 25 avril 2003, accepté le 25 janvier 2004