

Z. Geomorph. N. F.	34	4	435-450	Berlin · Stuttgart	Dezember 1990
--------------------	----	---	---------	--------------------	---------------

Le beach-rock de Temae (Ile de Moorea – Polynésie française) Signification géomorphologique et processus diagénétiques

par

PAUL BERNIER, JACQUES BONVALLOT, RÉMI DALONGEVILLE et ABEL PRIEUR

avec 6 figures et 8 photos

Zusammenfassung. Eine frühe Verfestigung durch Kalk an Tideküsten ist eine bekannte Erscheinung, die oft in Arbeiten als »beach-rock« beschrieben wurde. Allerdings werden die Umweltbedingungen der Bildungen noch diskutiert. Eine frühe Diagenese des beach-rock tritt nicht nur auf, wenn das Sediment nach der Ablagerung stabilisiert ist. Der beach-rock von Temae zeigt ein erstes Stadium der Zementierung in Relation zur Cyanobakterien-Aktivität. Ein oberflächlicher Cyanobakterien-Film kann das Sediment blockieren, und er erlaubt es, daß die Zementierung beginnt. Neue Beobachtungen auf der Insel Moorea (Französisch-Polynesien) bestätigen die Ergebnisse, die kürzlich von den Cycladen (Griechenland) beschrieben wurden. Die Zementierung des beach-rock kann nicht allein durch Klima und hydrodynamische Parameter erklärt werden, sondern ist auch das Ergebnis der Cyanobakterien, die sich auf dem Sand am Strand entwickeln und diesen festlegen.

Summary. Early carbonate tidal cementation is a well-known feature, often described in scientific papers as beach-rock. However, the environmental conditions of beach-rock cementation are still discussed. Early diagenesis of beach-rock does not occur only when sediment is stabilized after burying. Temae beach-rocks show a first stage of cementation in relation to cyanobacterial activity. A superficial cyanobacterial film can block the sediment and then allow the cementation process to begin. New observations made in Moorea island (French Polynesia) confirm the results recently described in the Cycladic islands (Greece). Beach-rock cementation cannot be explained only by climatic and hydrodynamic parameters but it is also the result of cyanobacterial networks which develop on the beach sand thereby maintaining it in place.

Résumé. Si le beach-rock est une des formes les plus répandues des cimentations littorales carbonatées et les plus décrites dans la littérature spécialisée, les conditions d'environnement dans lesquelles il se constitue sont encore mal cernées. La diagenèse précoce n'exige pas obligatoirement une immobilisation du sédiment par enfouissement. Les beach-rocks de Temae présentent un premier stade de cimentation lié à l'activité cyanobactérienne. Un réseau filamenteux microbien superficiel suffit à bloquer le sédiment et à lancer le processus d'induration. Les observations réalisées dans l'île de Moorea (Polynésie française) viennent confirmer les résultats obtenus récemment dans les Cyclades (Grèce), montrant par là que les paramètres climatiques et hydrodynamiques sont loin d'être les seuls en cause pour expliquer la naissance d'un beach-rock.

0372-8854/90/0435 \$ 4.00

© 1990 Gebrüder Borntraeger, D-1000 Berlin · D-7000 Stuttgart

15 MAI 1991

ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 31-936 ex 1

Cote : B 1 134

I Introduction et position du problème

Le *beachrock* ou *beach-rock* (GINSBURG 1953, EMERY & COX 1956, RUSSEL 1959, KAYE 1959, MC INTYRE 1965, STODDART & CANN 1965), également appelé *grès de plage* (GUILCHER 1961), est une des formes prises par les cimentations carbonatées littorales dites précoces. Rappelons la définition élaborée à l'issue du colloque de Lyon (DALONGEVILLE 1984): «Le beach-rock, qui présente le plus souvent une disposition en dalles inclinées vers la mer, est une formation sédimentaire indurée sous l'effet d'une cimentation carbonatée (aragonite ou calcite magnésienne initialement) réalisée au niveau de l'étage médiolittoral. Il existe des beach-rocks fossiles, situés à des altitudes supérieures ou au contraire inférieures au niveau actuel de la mer».

Le beach-rock est une des formes que peuvent prendre les cimentations littorales carbonatées dites «précoces». On considère généralement que les premières manifestations de la cimentation apparaissent dès l'immobilisation du sédiment, si toutefois l'eau sursaturée en bicarbonate peut circuler entre les grains.

Il est communément admis que l'enfouissement est nécessaire: au cours d'une régression marine ou d'une progradation de la côte, le sédiment est recouvert par les dépôts corrélatifs et le beach-rock va naître au sein de ces formations.

Dans beaucoup de descriptions de l'environnement immédiat du beach-rock mis au jour (DALONGEVILLE & SANLAVILLE 1984), il est précisé que celui-ci est associé, stratigraphiquement et génétiquement, à des dépôts meubles taillés en falaise par la mer. Ces dépôts marins encaissants, progressivement déblayés au cours d'un recul de la ligne de rivage, libèrent le beach-rock. Le recul est la condition sine qua non de la matérialisation du beach-rock sur la plage.

Mais ce schéma évolutif n'est pas partout applicable. Un exemple sera pris au Togo (MEDWECKI et al. 1989, AMIEUX et al. 1989). Le beach-rock, observable sur le trait de côte par suite d'un important recul du littoral (160 m en trois ans en certains endroits), est polychronique. Après sa formation (période de progradation), un premier beach-rock a été mis au jour (période de recul) et en partie démantelé (formes de dissolution, fractures). Il a été ensuite enseveli (période de progradation) par un autre sédiment dans lequel s'est produite une nouvelle cimentation oblitérant les formes d'érosion ménagées dans le premier. Puis, récemment (depuis 1975), cette formation complexe a été mise au jour. L'alternance de phases de progradation et de recul est marquée dans le beach-rock, une formation en ravinant une autre. L'apparente concordance entre la disposition des sédiments dans le beach-rock et celle des dépôts meubles surincombants est donc parfois trompeuse; elle ne doit pas amener à conclure à l'existence d'un unique stock sédimentaire.

Récemment, la preuve a été apportée que l'enfouissement du sédiment dans lequel va se produire la diagenèse précoce n'est pas un processus obligatoire. C'est ce que montrent les observations réalisées dans les Cyclades (BERNIER & DALONGEVILLE 1988). L'immobilisation du matériel peut être assurée, en surface, par un voile stromatolithique (Cyanobactéries épilithes, encroûtantes, perforantes, cariantes) qui piège la micrite dans les interstices du sédiment. Certes, d'autres auteurs (GINSBURG, op. cit., NESTEROFF 1954, KOBLUK & RISK 1977, PURSER 1980, SCHOLLE et al. 1983) avaient déjà émis l'hypothèse d'une activité bactérienne ou cyanobactérienne dans la cimentation précoce des dépôts de plage, sans en préciser la

nature. Ce processus d'immobilisation du sédiment par les Cyanobactéries, est probablement accompagné d'autres processus, chimiques et biochimiques. C'est sans doute un mécanisme comparable qui permet l'élaboration de la dalle intertidale horizontale dans le Golfe Persique (PURSER, op. cit.).

Les beach-rocks de Polynésie française, et de Temae en particulier, montrent dans certains cas que, comme dans les Cyclades, les Cyanobactéries sont à l'origine de l'immobilisation du matériel sédimentaire. Dès lors, les nombreux témoignages rapportant l'inclusion d'objets tels que des bouteilles dans les beach-rocks sont crédibles, puisque l'immobilisation du sédiment s'opère en surface. Il n'en reste pas moins qu'un beach-rock peut être polychronique et que des objets peuvent être inclus dans une cimentation de type stromatolithique (en ravinant un beach-rock cimenté par enfouissement).

De grands progrès restent à accomplir dans l'étude des cimentations littorales de type beach-rock. Un des problèmes qu'il faut essayer de résoudre est la notion de «précocité» de l'induration. Si une cimentation calcitique peut être très rapidement obtenue en laboratoire (BILLY et al. 1976, CASTANIER 1987) et si elle peut commencer dès l'immobilisation des grains dans un site naturel, nous ne savons pas exactement, dans les faits, quand se produit cette cimentation. Les datations au ^{14}C effectuées jusqu'à ce jour l'ont été sur du matériel coquillier ou corallien, datant par cela la mort des organismes. Quelques essais ont cependant été faits à partir de ciments. S'il s'agit d'éléments non repris, la datation donne l'âge du dépôt, mais bien évidemment pas celle des ciments. Microscopiques, ils sont très difficiles à séparer de leur support et il est souvent peu aisé d'obtenir la quantité suffisante pour qu'une datation isotopique soit tentée et pour qu'elle soit fiable bien que de nouvelles techniques permettent des datations à partir de quelques milligrammes de carbone seulement. Si, de plus, existent des phases successives de cimentation, l'expérience ne peut qu'échouer. Il convient également de rapprocher les différentes générations de cimentation, repérées à l'examen microscopique, d'un rythme d'évolution littorale: saisonnier, annuel, décennal, séculaire, voire aléatoire.

II Environnement géomorphologique des affleurements de beach-rock de Temae

L'île haute volcanique de Moorea ($17^{\circ}30' \text{ S} - 149^{\circ}50' \text{ W}$) culminant à 1207 mètres d'altitude est formée d'un empilement de roches volcaniques basiques (basaltes, hawaïites...) et de roches plus évoluées (benmoreïtes) émises par le «hot-spot» générateur de l'archipel des Îles de la Société (DUNCAN & Mc DOUGALL 1976) situé à 190 kilomètres dans le sud-est, à proximité de l'île de Mehetia.

Les datations radiométriques K-Ar (BELLON & BLANCHARD 1981) mettent en évidence deux cycles effusifs majeurs associant les types de roches précédemment mentionnés, le premier entre 2,10 et 1,80 MA, le second entre 1,50 et 1,10 MA. Mais des études plus récentes (DIRAISON et al. 1989) ne retiennent plus la présence de deux cycles mais d'un seul entre 2,20 et 1,50 MA.

Depuis sa construction, Moorea a subi une évolution géomorphologique complexe qui s'est manifestée par l'effondrement de la partie nord de l'édifice volcanique et le façonnement progressif sous climat tropical d'un relief de dissection caractérisé par des vallées profondément encaissées s'ouvrant sur une étroite plaine côtière.

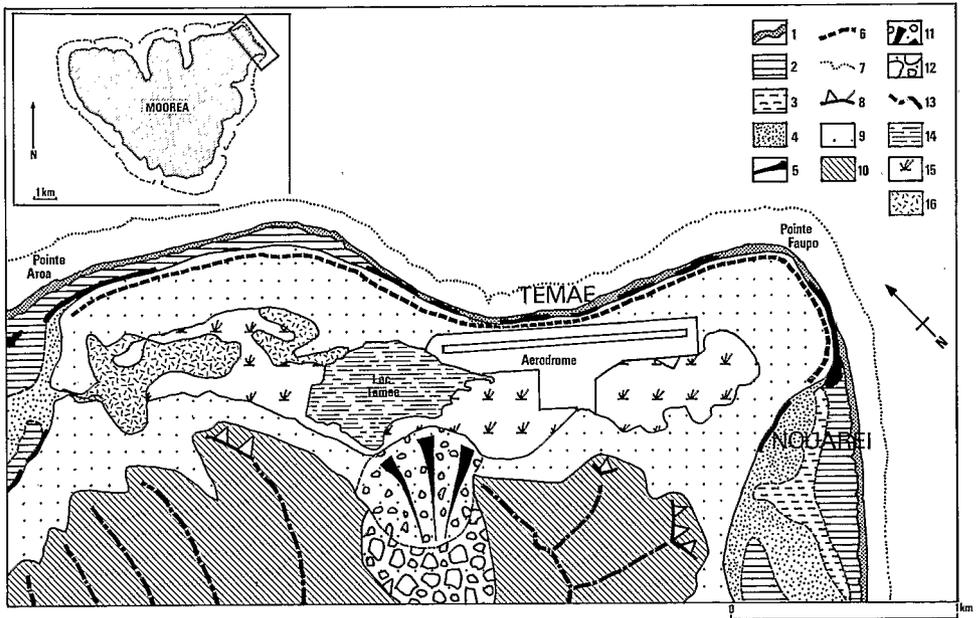


Fig. 1. Environnement géomorphologique du beach-rock de Temae.

- 1: Crête - Ridge
- 2: Platier compact - Compact reef flat
- 3: Platier mixte - Compact and detritic reef flat
- 4: Platier sableux - Sandy reef flat
- 5: Beach-rock et conglomérat récifal - Beach-rock and reef conglomerate
- 6: Levée de plage - Beach ridge
- 7: Tombant - Precipitous slope
- 8: Falaise morte - Dead cliff
- 9: Plaine sableuse - Sandy plain
- 10: Relief de dissection des basaltes - Dissection relief of the basalts
- 11: Cône de déjection - Alluvial fan
- 12: Vallée avec colluvions - Valley with colluvial formations
- 13: Principale ligne de crête - Main crest line
- 14: Lac - Lake
- 15: Marais - Swamp
- 16: Marais dépourvu de végétation - Swamp without vegetation

La frange littorale est occupée par un récif-barrière limitant vers l'Océan un lagon de 0,5 à un kilomètre de large. La barrière récifale est interrompue par une douzaine de passes qui assurent les échanges d'eau entre le lagon et la haute mer.

Dans la zone de Temae, à l'angle nord-est de Moorea et sur 4 kilomètres environ, le récif-barrière est tangent au littoral, cette configuration présentant beaucoup d'analogies avec la disposition des terres émergées que l'on rencontre dans les atolls des Tuamotu.

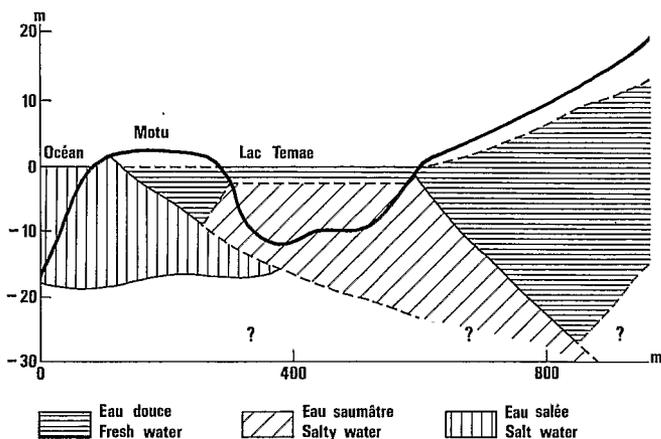


Fig. 2. Coupe hydrogéologique de Temae.

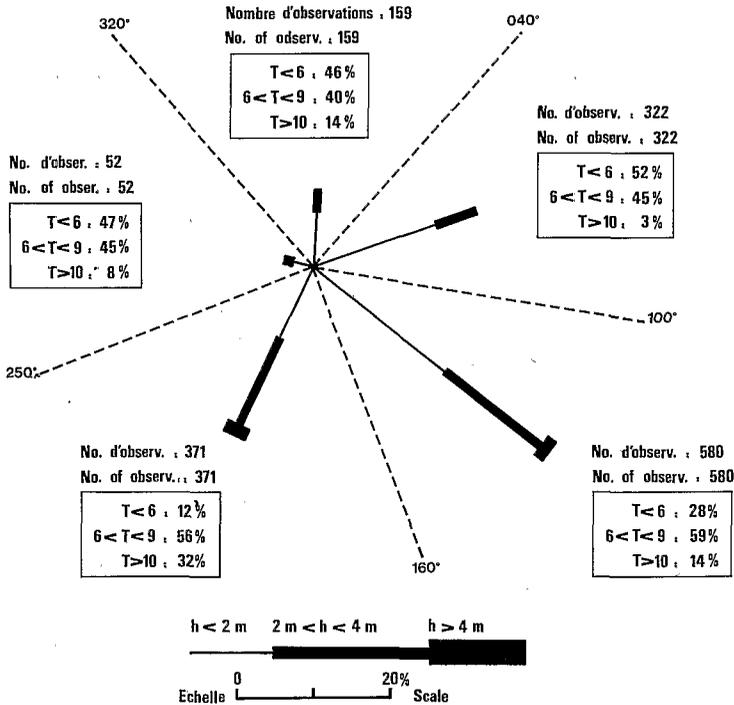
Les coulées basaltiques métriques disséquées, souvent masquées par des manteaux d'altérites, à léger pendage vers le nord-est, se terminent brusquement au-dessus d'une petite plaine littorale occupée par la dépression du lac saumâtre de Temae. Cette zone basse est prolongée de part et d'autre du lac, suivant un axe sud-est - nord-ouest par des étendues marécageuses, l'ensemble étant drainé vers le nord-ouest et la pointe Aroa. Le contact plaine montagne est localement matérialisé par un abrupt accentué assimilé à une falaise morte, d'ailleurs présente en d'autres secteurs de l'île. Une vallée largement ouverte débouche au sud du lac Temae et son cône de déjection sablo-graveleux s'avance jusqu'aux rives du lac (fig. 1).

La plaine est issue du remplissage par des alluvions terrigènes hétérométriques à dominante fine d'un lagon dont le dernier témoin serait le plan d'eau actuel (BURLLOT et al. 1985). Mais lorsqu'on approche du trait de côte, ce comblement peut être également le fait de dépôts biodétritiques (MONTAGGIONI 1989), résultats du démantèlement des constructions coralliennes littorales et du colmatage de la zone d'arrière-récif durant la période holocène.

Dans le détail, la plaine est formée par la dépression du lac Temae, vaste lagon en voie de comblement dont la profondeur dépasse 11 mètres et par une levée graveleuse littorale. Les études hydrogéologiques qui ont été menées pour la prospection d'eau par sondages électriques (BURLLOT et al., op. cit.) ont révélé une géométrie complexe des diverses entités hydrogéologiques de la plaine. Le contact entre l'eau douce continentale et l'eau salée océanique se fait par l'intermédiaire d'un réservoir d'eau saumâtre qui s'étend sous le lac Temae et dans ses eaux profondes (fig. 2).

La partie littorale de la plaine est occupée par une lentille d'eau douce alimentée partiellement par les eaux pluviales, le contact entre les eaux douces et les eaux salées affleurant au niveau du tiers supérieur de la plage. Lorsque cette lentille est mise en charge par de fortes pluies, il y a écoulement gravitaire par de multiples petits

Nombre total d'observations : 1484 .
 Total number of observations : 1484 .



Données du Service de la Météorologie Nationale .
 Data from the National Meteorological Service .

Fig. 3. Distribution des houles.

sourcins sur la plage notamment dans la baie de Nuarei au sud-est de la zone de Temae.

La plage de Temae, du fait même de sa position assez exposée face à la houle de nord-est est constamment remaniée par le déferlement des vagues (fig. 3). Elle a, en règle générale, un profil très abrupt, plusieurs levées parallèles formées de graviers mobiles s'entassant jusqu'à former un haut de plage situé entre 2 m et 4 m d'altitude. Dans la baie de Nuarei, moins battue, la barrière corallienne étant à plusieurs centaines de mètres du trait de côte, la plage est plutôt formée de sable corallien. Le marnage reste toujours faible, de l'ordre de 25 cm au marégraphe de Papeete dans l'île voisine de Tahiti.

Mais quelle que soit la granulométrie de la plage, c'est à Temae que se rencontrent les plus constants affleurements de beach-rock de Moorea. Ils cohabitent en

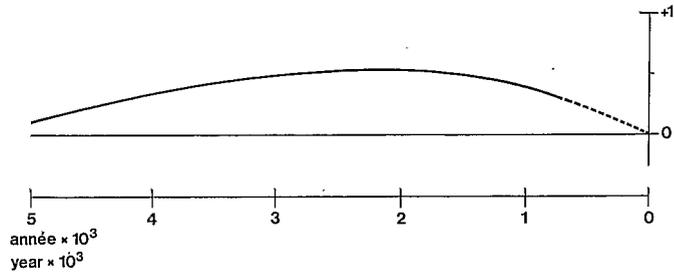


Fig. 4. Variation du niveau marin à Moorea.

général avec des conglomérats récifaux, cimentations calcaires de débris coralliens, particulièrement étendus au sud de la Pointe Faupo, à l'entrée de la baie de Nuarei. Ces formations ont été bien étudiées en Polynésie (CHEVALIER 1977, MONTAGGIONI & PIRAZZOLI 1984, PIRAZZOLI et al. 1985) notamment sur la côte Est de Moorea, au Motu Ahi et à Temae.

Ce sont les témoins d'un haut stationnement marin holocène (niveau relatif), situé à 0,5 mètre au-dessus du niveau actuel (MONTAGGIONI & PIRAZZOLI, op. cit.), les datations ^{14}C effectuées sur des échantillons de Moorea leur donnant un âge de 6070 ± 130 BP à 1370 ± 100 BP suivant leur position topographique par rapport au zéro actuel. A la faveur des études menées sur ces affleurements, une courbe de variation du niveau marin durant les cinq derniers millénaires a donc pu être établie pour Moorea (PIRAZZOLI et al., op. cit.). Elle est caractérisée par un maximum au voisinage de +50 cm entre 3000 et 2000 BP et par une décroissance progressive jusqu'au niveau actuel, l'incertitude restant totale quant à une éventuelle remontée de la mer au cours des deux derniers siècles (fig. 4).

A Temae, les observations que l'on peut cependant faire sur les affleurements de conglomérats et de beach-rock, en position plutôt transgressive par rapport à eux (GALZIN & POINTIER 1985) les montrent toujours fortement démantelés comme si ces désordres enregistraient une légère remontée du zéro hydrographique.

Deux séquences de beach-rock ont été plus particulièrement étudiées (fig. 5).

La première, située dans la baie de Nuarei ($17^{\circ}29'05$ Sud - $149^{\circ}45'56$ Ouest) est actuellement relativement abritée des houles qui déferlent sur la barrière corallienne. Plusieurs «dalles», d'épaisseur décimétrique, se recouvrent l'une l'autre en échelons dans l'étage médiolittoral, s'inclinent doucement, suivant une pente de 6° , vers le lagon et passent sous une plage de sables grossiers côté terre. Dans le lagon, sous une vingtaine de centimètres d'eau, les dalles cessent brusquement en formant un petit abrupt dont le pied est fossilisé par des sables détritiques coralliens fins. Les éléments constitutifs du beach-rock sont ici essentiellement des fragments de coraux morts de la taille des cailloux et des graviers (0,20 à 20 cm) associés à des débris coquilliers et à de rares galets de basalte.

La deuxième, en mode plus battu, a été étudiée dans la baie largement ouverte vers l'est au droit de l'aérodrome de Temae. Ici, les dalles de beach-rock, lissées en surface par l'abrasion marine, sont situées au-dessus du zéro hydrographique jusqu'à

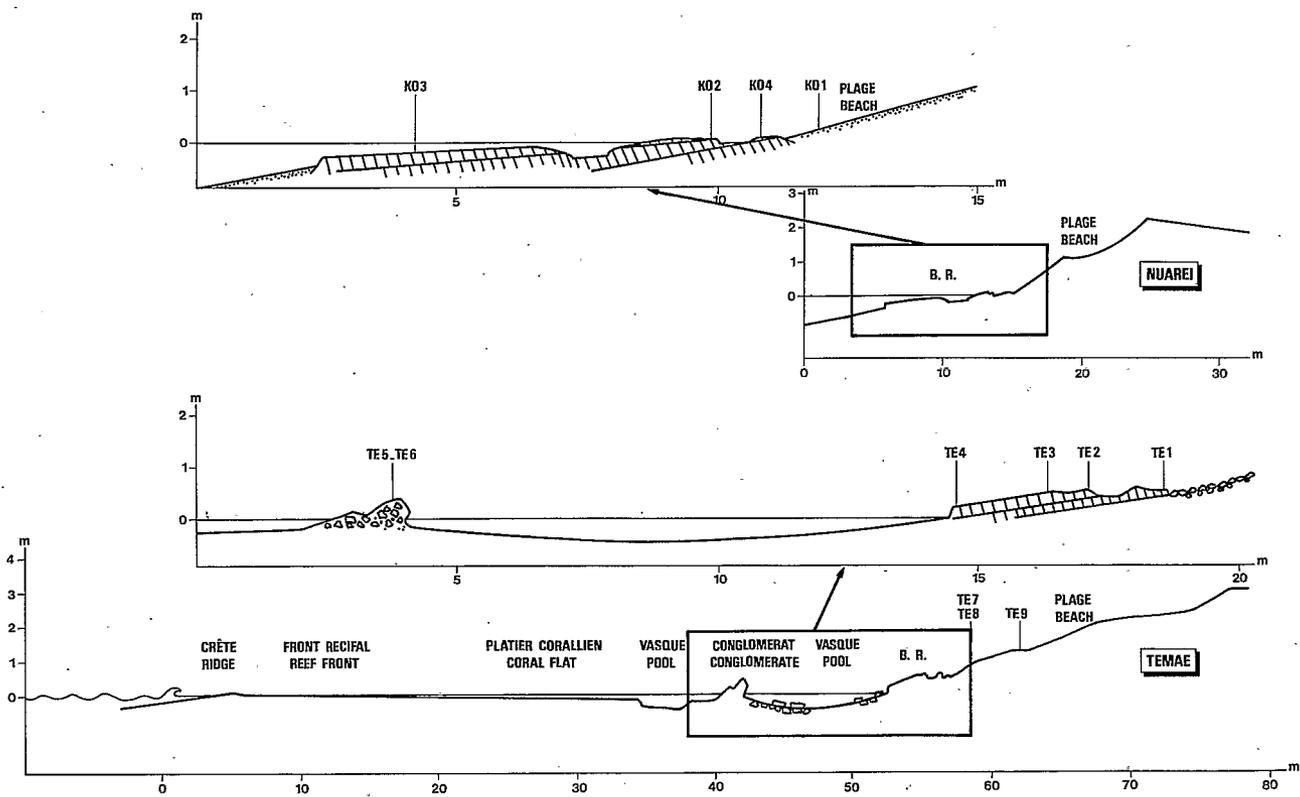


Fig. 5. Profils topographiques du beach-rock de Temae.

plus de 50 centimètres d'altitude. Elles présentent, comme dans le cas de celles de Nuarei, une stratification très nette et un pendage voisin de 11°. Mais ici, elles ne se prolongent pas sous la plage actuelle. Leurs éléments constitutifs ne semblent pas marquer de différence sensible avec ceux de Nuarei, bien que le plus fort pendage puisse indiquer un mode de dépôt plus turbulent. La proportion de galets de basalte est cependant plus forte. Vers l'aval, une microfalaise d'une vingtaine de centimètres de haut marque le contact du beach-rock avec une cuvette à fond rocheux de calcaire corallien parsemée de blocs libres, au milieu de laquelle s'individualise un petit relief conglomératique déchiqueté par la houle et les embruns. Cet affleurement, témoin vraisemblable de l'ancien platier récifal holocène, se trouve à une altitude sensiblement égale à celle du tiers inférieur des dalles de beach-rock, indice d'une possible antécédence par rapport au dépôt des matériaux constitutifs de celles-ci. Au-delà s'étend un classique platier corallien souvent bio-érodé, sous quelques centimètres d'eau avant le front récifal sur lequel déferlent les vagues, recouvert d'algues et de corail vivant.

III Cimentation des beach-rocks de Temae

Deux types de cimentation peuvent être observés dans les beach-rocks:

- Le premier, de type classique, consiste en une cristallisation palissadique d'aiguilles d'aragonite, typique du milieu phréatique marin.
- Le deuxième montre des grains enrobés par un liseré micritique d'épaisseur variable, au-delà duquel se développe la cristallisation aragonitique.

L'enrobage micritique du deuxième type de cimentation est probablement à mettre en relation avec les observations faites récemment dans les beach-rocks des Cyclades en Grèce (BERNIER & DALONGEVILLE, op. cit.). Un tel enrobage est dû à l'activité de Cyanobactéries qui ont pu être isolées et déterminées: *Entophysalis*, *Plectonema*, *Schizothrix*, *Rivularia*, *Phormidium*, *Lyngbia*, *Microcoleus* (détermination: Th. Le Campion-Alsumard).

L'activité cyanobactérienne avait déjà été soupçonnée par CLOUD (1952) à Onotoa Atoll (Gilbert Islands) comme un élément de fixation des sables avant la lithification précoce. DOTY (1954) notait la présence d'algues bleues dans les sables superficiels de Caroline du Nord (U.S.A.). Observant de telles algues bleues, GINSBURG (op. cit.) leur attribuait un rôle uniquement perforant. KOBLOK & RISK (op. cit.) envisagent qu'une activité microbienne épilithe puisse intervenir et les filaments observés au M.E.B. sont attribués aux Cyanobactéries. PURSER (op. cit.) décrit dans le Golfe Persique des croûtes horizontales minces résultant de l'activité cyanobactérienne dans l'étage médiolittoral. Mais la certitude du rôle moteur des Cyanobactéries dans la stabilisation du sédiment et permettant la cristallisation ultérieure n'a été acquise que récemment grâce aux observations effectuées dans les Cyclades.

1 Description de l'enrobage micritique

Les grains constituant le sable sont des fragments de madréporaires, de bivalves et d'autres organismes associés à des grains divers tous carbonatés: intraclastes, pellets, etc... Les éléments quartzeux font défaut.

L'enrobage micritique affecte les grains sans discrimination. Lorsque l'espace poreux est assez vaste, la micrite a tendance à envahir cet espace de façon non gravitaire, en constituant des protubérances dans des directions variées de l'espace.

Les grains ne semblent pas être affectés (ou le sont peu) par la micritisation liée à la perforation (BATHURST 1979). Le mécanisme observé est centrifuge et non pas centripète. Il ne peut y avoir confusion avec les enveloppes micritiques qui corrodent les grains.

2 *La cimentation aragonitique*

La cristallisation d'aragonite s'organise en gerbes d'aiguilles disposées à la périphérie des grains. Ces cristaux sont le plus souvent palissadiques et isopaches. Toutefois, dans certains cas, on observe une disposition stalactitique des cristaux. Il semble, en outre, que la croissance cristalline ne se soit pas manifestée partout avec la même importance, sans qu'il soit possible d'en déterminer le mécanisme. La disposition palissadique isopache d'aiguilles d'aragonite est le résultat de la circulation d'eaux marines dans le sens horizontal, en liaison avec le mouvement de la marée (étage médiolittoral). La disposition stalactitique des aiguilles d'aragonite est à mettre en relation avec la percolation verticale d'eaux marines dans la zone des embruns (étage supralittoral).

Il semble dans certains cas que l'importance de la croissance cristalline soit en relation directe avec celle de la micrite sous-jacente (TE 4, photos 3 et 4). Cette disposition de la cristallisation est à rapprocher des observations effectuées par DAVAUD (1987). Le liseré noir correspondrait pour cet auteur à un film bactérien qui induirait la cristallisation d'aiguilles d'aragonite.

La cimentation précoce liée à l'activité cyanobactérienne a été remarquée récemment dans les cimentations littorales de Délos et de Rhénée (BERNIER & DALONGEVILLE, op. cit.). En outre, plusieurs générations cristallines et micritiques alternées y ont été observées. A Temae, ce phénomène n'apparaît que de façon discrète dans le beach-rock (TE 4) mais de façon beaucoup plus nette dans les conglomérats récifaux cimentés (TE 5 et 6, photos 7 et 8) sans relation directe avec le beach-rock (fig. 5). Dans ce dernier cas, l'activité cyanobactérienne centripète est intense. La micrite inclut même de fins débris de tests, voire de petits foraminifères, qui s'orientent selon une direction conforme à la périphérie de la zone micritique (photos 5 et 6). Cela signifierait que l'activité microbienne alterne avec l'activité cristalline et que l'une puisse inhiber l'autre. La reprise d'activité biologique pourrait être due à la réappari-

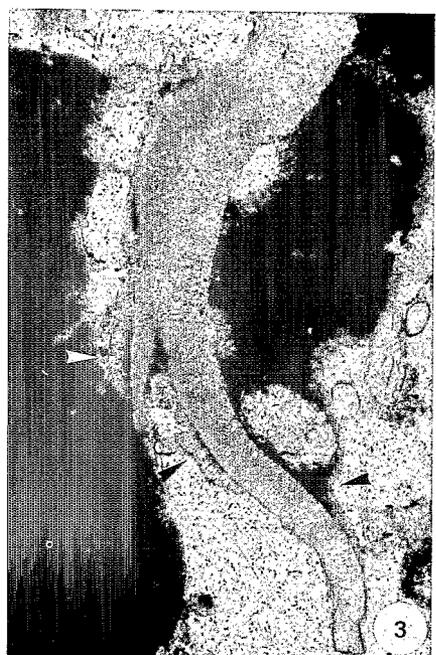
Photos 1-4.

1: Sable calcaire constitué de fragments divers (madréporaires, bivalves, intraclastes) enrobés d'une pellicule micritique reliant les grains entre eux. Cette pellicule, d'épaisseur variable, correspond à la croissance de Cyanobactéries dans l'espace poreux sans relation gravitaire. Temae, TE3, x 15, lumière naturelle.

2: Même préparation que (1) en lumière polarisée.

3: Section de bivalve montrant la relation existant entre la cristallisation aragonitique et la pellicule micritique sous-jacente: la cristallisation est absente dès lors que la pellicule apparemment noire est absente (flèches). Temae, TE4, x 70, lumière naturelle.

4: Même préparation que (3) en lumière polarisée.



tion de conditions favorables (humectation, lumière...) au sein du sédiment, selon un rythme saisonnier de démaigrissement et de progradation ou un rythme de période plus longue, d'origine eustatique ou tectonique.

IV Discussion

Du point de vue morphologique et sédimentologique, les beach-rocks de Temae n'ont pas de caractéristiques bien particulières. Ce sont ici, comme dans la majorité des cas, des structures sédimentaires probablement acquises en phase de progradation littorale et cimentées par le cortège habituel de cristaux carbonatés. Elles ont été mises au jour par recoupement d'un stock sédimentaire ancien déposé un peu plus haut que la plage actuelle lors d'un haut stationnement marin ou bien porté plus haut par un léger mouvement tectonique positif (PIRAZZOLI et al., op. cit.).

Sur la façade battue par la houle, le beach-rock est situé à une altitude plus élevée que le long de la partie abritée du littoral, ce qui montre bien que les conditions hydrodynamiques dues à l'exposition n'ont pas été sensiblement modifiées dans un passé récent et vraisemblablement pas au cours des trois derniers millénaires.

La constance des conditions hydrodynamiques se traduit également dans la composition faunistique. La faune des plages actuelles est sensiblement la même que celle qui est cimentée dans le beach-rock (fig. 6). Ceci atteste bien le passage très progressif d'un haut niveau marin (relatif) à un niveau actuel légèrement plus bas.

Les ciments de ces beach-rocks, étudiés au microscope, montrent qu'ils se sont élaborés en plusieurs phases dans le domaine phréatique marin médiolittoral inférieur ou infralittoral (cristallisation aragonitique) et en milieu vadose supralittoral (cimentation micritique). L'interface eau douce-eau salée ne semble pas, pour les échantillons étudiés, être l'agent de la cimentation comme cela avait été présenté par TRICHET (1965). Il se peut cependant que ce soit localement une zone de cimentations préférentielles, mais elle ne saurait expliquer toutes celles qui, généralement, respectent une stratigraphie préexistante, comme c'est le cas ici.

Il est particulièrement intéressant de noter que l'étude d'échantillons de beach-rocks aussi différents que ceux des Cyclades en milieu presque exclusivement cristal-

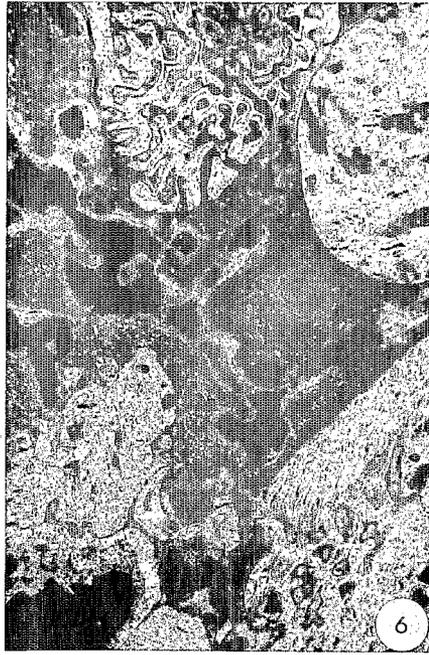
Photos 5-8.

5: Sable calcaire constitué de fragments de madréporaires reliés entre eux par un ciment micritique cyanobactérien. La micrite est clairement centrifuge, l'activité cyanobactérienne n'a pas corrodé les grains. En outre les micrograins sparitiques clairs inclus dans la micrite présentent une disposition grossièrement en accord avec le développement microbien. Temae TE5, x 15, lumière naturelle.

6: Même échantillon observé en lumière polarisée. On remarque nettement la cristallisation palissadique aragonitique à la périphérie de la micrite. L'espace poreux restant est éteint et apparaît noir sur la photo. Temae TE5, x 15, lumière polarisée.

7: Autre secteur de la même préparation montrant que les fragments de madréporaires peuvent être associés à des intraclastes micritiques. Les grains sont enrobés de micrite cyanobactérienne à croissance centrifuge. La cristallisation aragonitique suit le contour de la périphérie de la micrite. Temae TE5, x 15, lumière naturelle.

8: Agrandissement d'une partie de la photo 3 montrant que la cristallisation aragonitique est elle-même affectée de zones de croissance successives limitées par un liseré gris-noir pouvant être lui-même lié à une reprise momentanée de l'activité cyanobactérienne (BERNIER & DALONGEVILLE 1988). Temae, TE5, x 45, lumière polarisée.



LOCALISATION	TEMAE									NUAREI			
	Actuel			Beach-rock						Act.	BR		
	TE 7	TE 8	TE 9	TE 1	TE 2	TE 3	TE 4	TE 5	TE 6	KO 1	KO 2	KO 3	KO 4
BIVALVES													
<i>Pteria</i> sp.			*				*				*		
<i>Arcidae</i>			*								*		
<i>Barbatia plicata</i>	*	*	*								*	*	
<i>Arca imbricata</i>	*	*	*								*		
<i>Modiolus auriculatus</i>	*	*	*								*		
<i>Chama pacifica</i>	*	*	*								*		
<i>Mytilidae</i>	*	*	*								*		
<i>Codakia divergens</i>		*	*								*		
<i>Codakia punctata</i>	*		*								*		
<i>Isognomon sulcata</i>		*	*								*		
<i>Isognomon nucleus</i>			*								*		
<i>Tridacna</i> sp.			*								*		
GASTÉROPODES													
<i>Strombus mutabilis</i>	*		*										
<i>Strombus</i> sp.			*										
? <i>Strombus urceus</i>			*										
<i>Vexillum unifasciatum</i>		*	*										
<i>Vexilla vexillum</i>		*	*										
<i>Erosaria</i> sp.		*	*										
<i>Patella flexuosa</i>	*	*	*										
<i>Diodora ruppellii</i>	*	*	*										*
<i>Bitium</i> sp.	*	*	*										*
<i>Cypraeidae</i>			*										*
<i>Cypraea</i> sp.			*								*		*
<i>Conus</i> sp.	*		*								*		*
<i>Conidae</i>			*								*		*
<i>Morula</i> s.s.	*	*	*								*		*
<i>Morula granulata</i>	*	*	*	*			*	*			*		*
<i>Rissoina ambigua</i>	*	*	*	*			*	*			*		*
<i>Turbo</i> sp.	*	*	*	*			*	*			*		*
<i>Turbo setosus</i>	*		*	*			*	*			*		*
<i>Cantharus undosus</i>	*		*	*			*	*			*		*
<i>Cerithium</i> sp.			*	*			*	*			*		*
? <i>Cerithium columba</i>		*	*	*			*	*			*		*
<i>Cerithium mesoaiacum</i>		*	*	*			*	*			*		*
<i>Cerithium alveolus</i>	*		*	*			*	*			*		*
<i>Nerita</i> sp.	*		*	*			*	*			*		*
<i>Nerita plicata</i>		*	*	*			*	*			*		*
<i>Nerita undata</i>		*	*	*			*	*			*		*
<i>Drupa ricinus</i>		*	*	*			*	*			*		*
<i>Eulima aciculata</i>	*	*	*	*			*	*			*		*
<i>Drupella cariosa</i>	*	*	*	*			*	*			*		*
<i>Hipponyx pilosus</i>	*	*	*	*	*		*	*			*		*
<i>Hipponyx antiquatus</i>	*	*	*	*	*		*	*			*		*
<i>Planaxis lineatus</i>	*	*	*	*			*	*			*		*
<i>Homalopoma maculosa</i>			*	*			*	*			*		*
<i>Engina</i> sp.		*	*	*			*	*			*		*
<i>Morula granulata</i>		*	*	*			*	*			*		*
<i>Nerita plexa</i>		*	*	*			*	*			*		*
<i>Triphora papillata</i>	*		*	*			*	*			*		*
<i>Bitium zebraum</i>			*	*			*	*			*		*
<i>Triphora</i> sp.			*	*			*	*			*		*
<i>Mitra</i> sp.			*	*			*	*			*		*
<i>Siphonium maximus</i>	*	*	*	*	*		*	*			*		*
<i>Spirogyphus annulatus</i>	*	*	*	*	*		*	*			*		*
<i>Liotina peronii</i>			*	*			*	*			*		*
AUTRES													
Crabe	*	*	*								*		*
Cirripède	*	*	*								*		*
Radioles d'oursins	*	*	*	*	*		*	*			*	*	*
Fragments coraux	*	*	*	*	*		*	*			*	*	*
Indéterminés	*	*	*	*	*		*	*			*	*	*

Fig. 6. Liste comparée de la faune récoltée dans le sédiment meuble de la plage et dans le beach-rock, à Temae et à Kia Ora.

lin (BERNIER & DALONGEVILLE, op. cit.) et de Moorea en milieu presque exclusivement carbonaté, nous amène à formuler des conclusions identiques quant au mode d'immobilisation du matériel préparant l'induration.

Cette immobilisation est due à des films cyanobactériens réclamant de la lumière pour leur développement. C'est donc un processus de surface. L'enfouissement du matériel par progradation n'est pas nécessaire. Les beach-rocks de Temae montrent donc qu'ils se sont solidifiés en plusieurs phases. Il y aurait d'abord eu immobilisation précoce du sédiment par les Cyanobactéries et cimentation d'origine biologique avant la cristallisation d'aragonite qui nécessite un enfouissement, cristallisation d'ailleurs interrompue par des reprises de l'activité biologique.

Que ce soit pour les conditions d'immobilisation du matériel sédimentaire ou pour le milieu préférentiel dans lequel s'effectuent les cimentations littorales carbonatées précoces, il ne semble donc pas qu'il y ait de règles strictes pouvant s'appliquer à tous les cas. Le beach-rock peut en fait naître de phénomènes de convergence associant des processus différents. Dans le cas des affleurements de Temae, vraisemblablement plus récents que les conglomérats coralliens holocènes auxquels ils sont associés, les deux types de cimentation mis en évidence tendent à montrer une activité biologique alternant avec une activité cristalline, ce phénomène traduisant en fait des rythmes hydrodynamiques encore mal connus, qu'ils soient saisonniers ou de période plus longue due à la tectonique ou à l'eustatisme.

Bibliographie

- AMIEUX, P., P. BERNIER, R. DALONGEVILLE & V. DE MEDWECKI (1989): Cathodoluminescence of carbonate-cemented Holocene beachrock from the Togo coastline (West Africa): an approach to early diagenesis. – In: SELLWOOD, B. W. (ed.): Zoned carbonate cements: techniques, applications and implications. – *Sedim. Geol.* 65: 261–272; Amsterdam.
- BATHURST, R. G. S. (1979): Carbonate Sediments and their Diagenesis. – 658 p., 2nd enlarged ed., Elsevier, Amsterdam.
- BELLON, H. & F. BLANCHARD (1981): Aspects géochronologiques (K-Ar) de l'activité volcanique dans l'île de Moorea, Pacifique Central. – *Tectonophysics* 72: T33–T43; Amsterdam.
- BERNIER, P. & R. DALONGEVILLE (1988): Incidence de l'activité biologique sur la cimentation des sédiments littoraux actuels. L'exemple des îles de Délos et de Rhénée (Cyclades, Grèce). – *C. R. Ac. Sc.* 307: 1901–1907; Paris.
- BILLY, C., PH. BLANC & A. ROUVILLOIS (1976): Synthèse d'aragonite en milieu marin par voie bactérienne. – *Ann. Inst. Océanogr.* 52 (2): 231–239; Paris.
- BURLOY, R., F. FAISSOLLE, L. HUMBERT, P. LEBLANC, G. PELISSIER HERMITE & P. POUCHAN (1985): Relation eau douce-eau salée dans les systèmes carbonatés récifaux de Temae (Moorea). – 5th Intern. Reef Congr., Tahiti, 27 May – 1 June 1985. 6: 1–5.
- CASTANIER, S. (1987): Microbiogéologie: processus et modalités de la carbonatogenèse bactérienne. – Thèse Doct. Etat, Nantes, 541 p. multigr.
- CHEVALIER, J. P. (1977): Origin of the reef formations of Moorea Island (Archipelago of La Société). – *Proc. Third Internat. Coral Reef. Symp.*, Miami: 283–287.
- CLOUD, P. E. (1952): Preliminary report on the geology and marine environments of Onotoa Atoll, Gilbert Islands. – *Atoll Res. Bull.* 13: 1–73.
- DALONGEVILLE, R. (sous la direction de) (1984): Le beach-rock. – Actes du colloque «Beach-rock», Lyon, 1983, TM08, Maison de l'Orient, 197 p.
- DALONGEVILLE, R. & P. SANLAVILLE (1984): Essai de synthèse sur le beach-rock. [In:] DALONGEVILLE, R. (éd.): Le beach-rock. Actes du colloque «Beach-rock», Lyon, 1983, TM08, Maison de l'Orient: 161–167.
- DAVAUD, E. (1987): L'élévation rapide du niveau marin, son origine probable et ses conséquences certaines. – *Cah. Fac. Sci. Genève* 15: 27–39.

- DIRAISON, C., H. BELLON, C. LÉOTOT, R. BROUSSE & H. G. BARSCZUS (1989): L'alignement de la Société: volcanologie, géochronologie, proposition d'un modèle de hot-spot. – Bull. Soc. Géol. France.
- DOTY, M. S. (1954): Floristic and ecological notes on Raroia Atoll, Tuamotu. – Atoll Res. Bull. 33: 1–44.
- DUNCAN, R. A. & I. Mc DOUGALL (1976): Linear volcanism in French Polynesia. – J. Volcanol. Geotherm. Res. 1: 197–227.
- EMERY, K. O. & D. C. COX (1956): Beachrock in the Hawaiian Islands. – Pacific Science 10: 382–403; Honolulu.
- GALZIN, R. & J. P. POINTIER (1985): Moorea Island. – [In:] B. DELESALLE, R. GALZIN & B. SALVAT (eds): 5th Internat. Reef Congr. Tahiti, 27 May – 1 June 1985, 1: "French Polynesia Coral Reefs, Reef Knowledge and Field Guides": 73–102.
- GINSBURG, R. N. (1953): Beachrock in South Florida. – J. Sed. Petrology 23: 85–92; Tulsa.
- GUILCHER, A. (1961): Le «beach-rock» ou grès de plage. – Ann. Géographie, LXXè année, 378: 114–125; Paris.
- KAYE, C. A. (1959): Shoreline features and Quaternary shoreline changes. Puerto-Rico. A study of shore forms resulting from deposition and solution of CaCO₃ in tropical seas. – U.S. Geol. Surv., Prof. Pap. 317 B: 66–79; Reston.
- KOBLUK, D. R. & M. J. RISK (1977): Micritization and carbonate-grain binding by Endolithic Algae. – Amer. Assoc. Petr. Geol. Bull. 61 (7): 1069–1082; Tulsa.
- MC INTYRE, W. G. (1965): Southern hemisphere beach-rock. – Geogr. Rev. 55 (1): 17–45.
- MEDWECKI, V. DE, P. AMIEUX, P. BERNIER, R. DALONGEVILLE & G. ROSSI (1989): Le beach-rock togolais: un exemple d'évolution polychronique d'un littoral. – Bull. Lab. Géomorph. C.N.R.S. 36: 53–56; Caen.
- MONTAGGIONI, L. F. (1989): Milieux récifaux. Construction et érosion. – [In:] Atlas de la Polynésie Française, ORSTOM, Paris. [sous presse]
- MONTAGGIONI, L. F. & P. A. PIRAZZOLI (1984): The significance of exposed coral conglomerates from French Polynesia (Pacific Ocean) as indicators of recent relative sea-level changes. – Coral Reefs 3: 29–42; Berlin.
- NESTEROFF, W. D. (1954): Sur la formation des grès de plage ou «beach-rock» en Mer Rouge. – C. R. Ac. Sc., Paris, 128: 2547–2548.
- PIRAZZOLI, P. A. (1978): High Stands of Holocene Sea Levels in the Northwest Pacific. – Quaternary Res. 10 (1): 1–29.
- PIRAZZOLI, P. A., R. BROUSSE, G. DELIBRIAS, L. F. MONTAGGIONI, M. H. SACHET, B. SALVAT & Y. H. SINOTO (1985): Leeward islands (Maupiti, Tupai, Bora-Bora, Huahine), Society archipelago. [In:] DELESALLE, B., R. GALZIN & B. SALVAT (eds). – 5th Internat. Reef Congr., Tahiti, 27 May – 1 June 1985, 1: "French Polynesia Coral Reefs, Reef Knowledge and Field Guides": 17–72.
- PURSER, B. H. (1980): Sédimentation et diagenèse des carbonates néritiques récents. – Technip. 1, 366 p.; Paris.
- RUSSEL, R. J. (1959): Caribbean beach-rock observations. – Z. Geomorph. 3 (3): 227–236; Berlin.
- SCHOLLE, P. A. H., D. G. BEBOUT & C. H. MOORE (eds) (1983): Carbonate Depositional Environments. – AAPG Mem. 33: 708 p.
- STODDART, D. R. & J. R. CANN (1965): Nature and origin of beachrock. – J. Sed. Petrology 35: 243–247.
- TRICHET, J. (1965): Essai d'explication de l'origine des grès de plage. Cas de grès de plage coralliens. – C. R. Ac. Sc. Paris 261: 3776–3778.

Adresses des auteurs: PAUL BERNIER, Université Claude Bernard – Lyon 1, Centre des Sciences de la Terre et U.R.A. 11, 27–43, Boulevard du 11 Novembre, F-69622 Villeurbanne Cedex; JACQUES BONVALLOT, ORSTOM, B.P. 529, Papeete, Polynésie Française; RÉMI DALONGEVILLE, Maison de l'Orient., U.R.A. 913, 7, rue Raulin, F-69007 Lyon; ABEL PRIEUR, Université Claude Bernard – Lyon 1, Centre des Sciences de la Terre et U.R.A. 11, 27–43, Boulevard du 11 Novembre, F-69622 Villeurbanne, Cedex.