



Article scientifique

Article

1991

Published version

Open Access

This is the published version of the publication, made available in accordance with the publisher's policy.

---

## Enregistrement des variations eustatiques dans des dépôts littoraux du Pleistocène supérieur (San Giovanni di Sinis, Sardaigne occidentale)

---

Davaud, Eric Jean; Kindler, Pascal; Martini, Rossana; Strasser, Andréas

### How to cite

DAVAUD, Eric Jean et al. Enregistrement des variations eustatiques dans des dépôts littoraux du Pleistocène supérieur (San Giovanni di Sinis, Sardaigne occidentale). In: Bulletin de la Société géologique de France, 1991, vol. 162, n° 3, p. 523–533. doi: 10.2113/gssgfbull.162.3.523

This publication URL: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:155593>

Publication DOI: [10.2113/gssgfbull.162.3.523](https://doi.org/10.2113/gssgfbull.162.3.523)

## Enregistrement des variations eustatiques dans des dépôts littoraux du Pléistocène supérieur (San Giovanni di Sinis, Sardaigne occidentale)

par ERIC DAVAUD\*, PASCAL KINDLER\*\*\*, ROSSANA MARTINI\* et ANDRÉ STRASSER\*\*

**Mots clés.** – Tyrrhénien, Sardaigne, Sédimentologie, Stratigraphie séquentielle, Dépôts de plage, Chenal de marée, Dépôts éoliens, Dépôts lagunaires, Pédogenèse, Eustatisme.

**Résumé.** – Les dépôts littoraux du Pléistocène supérieur de Sardaigne ont été étudiés depuis le siècle dernier, mais n'ont jamais été abordés sous l'angle de la sédimentologie et de la stratigraphie séquentielle. Ce travail concerne un affleurement complexe situé sur la côte occidentale de la Sardaigne à proximité de San Giovanni di Sinis, affleurement dans lequel trois séquences de dépôts peuvent être identifiées.

La séquence inférieure surmonte une surface d'érosion entaillée dans les marnes messiniennes. Un conglomérat de base recouvert par des sables à rides de courant et laminations de plage témoigne d'un environnement marin littoral. L'essentiel de cette première séquence est cependant constitué de dunes éoliennes localement pédogénisées et de colluvions. Une importante surface d'érosion marque la limite supérieure de cette séquence.

Le conglomérat de base de la deuxième séquence qui renferme des galets pédogénisés passe à des sables à laminations de plage. Ces faciès sont surmontés par une lumachelle à *Mytilus* et par des vases bioturbées à ostracodes qui correspondent à des dépôts lagunaires. La présence localisée de charophytes et de rhizolithes traduit l'influence d'eaux douces et un début de pédogenèse. A nouveau, une importante surface d'émersion entaille ces dépôts.

La troisième séquence débute avec des faciès de plage et d'avant-plage très riches en corallinacées et s'achève avec des dépôts éoliens qui progressent par place directement sur des dépôts d'avant-plage et des dépôts de chenal de marée.

L'examen sédimentologique détaillé de cette dernière séquence suggère que les concepts de la stratigraphie séquentielle sont applicables à l'analyse de systèmes sédimentaires littoraux de dimension réduite.

Les principales surfaces d'érosion se sont formées durant des phases d'abaissement important du niveau marin et correspondent à des limites de séquences. Les conglomérats pourraient représenter les dépôts de l'intervalle transgressif, tandis que les successions « bathydécroissantes » pourraient correspondre au prisme de haut niveau marin.

Il est probable que les trois séquences identifiées, imputables à des variations eustatiques importantes, représentent l'enregistrement sédimentaire des trois cycles climatiques majeurs qui ont marqué le dernier interglaciaire entre 130 000 et 70 000 ans.

### Record of sea-level changes in Upper Pleistocene coastal deposits (San Giovanni di Sinis, western Sardinia, Italy)

**Key words :** Tyrrhenian, Sardinia, Sedimentology, Sequence stratigraphy, Beach deposits, Lagoonal deposits, Tidal channel deposits, Eolian deposits, Pedogenesis, Sea-level changes.

**Abstract.** – Tyrrhenian (Upper Pleistocene) coastal deposits in Sardinia have been studied since the last century, but have never been interpreted in terms of detailed sedimentology and sequential pattern. The present paper deals with an outcrop close to San Giovanni di Sinis on the western coast of Sardinia, where three depositional sequences can be identified.

The lowermost sequence overlies an erosion surface which cuts into Messinian marls. A basal conglomerate including coralline algae, and sandstones displaying current ripples and beach lamination point to a coastal-marine depositional environment. The bulk of the sequence, however, is made up of eolian dunes with interstratified paleosols, and of colluvial deposits. An erosional surface terminates this sequence.

The basal conglomerate of the second sequence contains pebbles with pedogenetic features, and is overlain by beach-laminated sands. Superimposed bioturbation and an important bed of in-situ *Mytilus* shells suggest that the coastal-marine environment passed into a lagoonal one. Ostracods, charophytes and pedogenesis indicate fresh-water influence and local emersion at the top of this sequence. Again, an erosional surface truncates the deposits.

The third sequence starts with shoreface and foreshore deposits rich in coralline algae and ends with eolian facies. Locally, the eolian dunes prograde directly over shoreface and tidal-channel deposits.

The major erosion surfaces probably formed during important drops of sea-level and correspond to sequence boundaries. The conglomerates are interpreted as transgressive deposits, whereas the shallowing-upward facies successions represent regressive highstand deposits.

The three sequences of San Giovanni di Sinis may thus have formed during three successive sea-level fluctuations, which can tentatively be correlated with the three climatic cycles during the last interglacial, i.e. between 130,000 and 70,000 years B.P.

#### I. – INTRODUCTION

Les dépôts tyrrhéniens du pourtour de la Sardaigne ont fait l'objet de nombreuses études depuis le siècle dernier. La plupart des travaux tentent de clarifier la stratigraphie

complexe de ces dépôts par des analyses géomorphologiques et macropaléontologiques. Depuis une dizaine d'années, les affleurements classiques ont été réexaminés et rééchantillonnés en vue d'établir un cadre chronostratigraphique à l'aide de la géochimie isotopique (U/Th) et organique (racémisation des acides aminés).

L'approche proposée dans cet article s'écarte de la démarche quaternariste classique mais la complète : elle consiste à utiliser systématiquement les informations bathymétriques fournies par les structures sédimentaires et dia-

\* Département de géologie et de paléontologie, 13 rue des Maraichers, 1211 Genève, Suisse.

\*\* Institut de Géologie, Pérolles 1700, Fribourg, Suisse.

\*\*\* R.S.M.A.S., Fisher Island Station, Miami Beach, FL 33139.

Manuscrit déposé le 7 mars 1990, accepté le 11 septembre 1990.

génétiques en vue d'établir avec précision l'évolution séquentielle des milieux de dépôts et d'en déduire l'évolution eustatique locale.

L'affleurement étudié est situé sur la côte occidentale de la Sardaigne au flanc de la péninsule qui abrite le nord du golfe d'Oristano (fig. 1). Cette péninsule est bordée au nord-est de marais littoraux qui prolongent les basses plaines côtières des environs d'Oristano. Elle est constituée jusqu'à 15 m d'altitude de dépôts littoraux quaternaires qui colmatent les dépressions d'un substrat formé de volcanites quaternaires et de dépôts marins tertiaires. L'affleurement se présente sous forme d'une falaise côtière, constamment rafraîchie par l'érosion marine, qui débute au NW du village de San Giovanni di Sinis et s'étend sur plusieurs centaines de mètres. Les variations latérales de faciès et les surfaces d'érosion peuvent être suivies en continu. Cet affleurement se prête remarquablement à une étude détaillée des séquences sédimentaires tyrrhéniennes.

Caloi *et al.* [1980] puis Ulzega et Ozer [1982] sont les premiers à en donner une description lithologique. Ces deux derniers auteurs proposent une coupe synthétique et une terminologie formationnelle pour la base de l'affleurement (fig. 2). Ils constatent que les variations latérales de faciès sont nombreuses et mettent en évidence une plate-forme d'abrasion marine inclinée vers le SE, séparant deux systèmes de dépôts. Les faciès continentaux (colluvions, éolianites et paléosols) situés entre cette surface et les argiles messiniennes qui forment le substrat des dépôts quaternaires sont définis comme la formation de San Giovanni. Cette formation est provisoirement attribuée par ces auteurs

au Tyrrhénien I, par comparaison avec les affleurements décrits par Pecorini [1954] au nord de l'île.

La description stratigraphique la plus précise des dépôts pléistocènes de la région de San Giovanni di Sinis est fournie par Carboni et Lecca [1985]. Ces auteurs décrivent en détail 22 coupes stratigraphiques échelonnées le long de la côte et mettent pour la première fois en évidence la présence de trois complexes marins (notés M1, M2 et M3) séparés par deux surfaces d'érosion majeures ( $\delta_3$  et  $\delta_4$ ). Ne disposant pas de datations absolues, ces auteurs restent très prudents sur l'attribution chronologique des différents épisodes marins. Ils proposent néanmoins une courbe eustatique locale et montrent que les trois pulsations transgressives ont approximativement atteint la même côte (4-6 m).

Ulzega et Hearty [1986], qui n'ont apparemment pas eu connaissance du travail de Carboni et Lecca [1985], donnent une colonne stratigraphique synthétique et ne mentionnent que deux épisodes transgressifs attribués à l'Eutyrrhénien (formation de Calamosca) et au Néotyrrhénien (fig. 2). Un échantillon daté par racémisation donne un âge compris entre 75 000 et 105 000 ans pour la base du deuxième épisode transgressif [*sensu* Ulzega et Ozer, 1982]. Cette datation est en contradiction avec les âges proposés précédemment par Wanet *et al.* [1982] pour le même niveau (fig. 2), mais elle est plus plausible pour des raisons qui seront développées plus loin.

Les diverses interprétations stratigraphiques proposées à ce jour ont été reportées sur la figure 2. On constate qu'elles divergent sur bien des points et que la plupart d'entre elles n'envisagent que deux événements transgressifs.

Pour ce travail neuf coupes stratigraphiques, échelonnées le long de la côte sur plus de 500 m (fig. 1), ont été relevées en détail et échantillonnées. Une attention particulière a été donnée à l'examen des structures sédimentaires en raison des indications fiables et souvent univoques qu'elles fournissent sur les milieux de dépôts. Chaque niveau a été échantillonné en plusieurs points en vue d'analyser les différentes phases de cimentation et de déceler d'éventuelles surimpressions pédogéniques.

### A) Description de l'affleurement et interprétation des milieux de dépôts

La figure 3 illustre la diversité des figures sédimentaires exposées le long de la falaise côtière. L'inclinaison et l'orientation des «foresets» ainsi que des surfaces d'érosion ont été respectées.

La partie basale des dépôts quaternaires est exposée à 300 m au NW de San Giovanni di Sinis (fig. 3, coupes a et b). Une surface d'érosion irrégulière fortement inclinée vers le SE (notée LS1 sur la fig. 3) entaille des marnes à globigérines [Messinien, Cherchi *et al.*, 1978]. Elle est soulignée par un conglomérat remaniant les marnes mais comprenant également des blocs de grès à corallinacées. Ce conglomérat est surmonté sur quatre mètres par des calcarenites à corallinacées et foraminifères benthiques qui se chargent en quartz silteux vers le haut (niv. 1-3, fig. 3). La succession des figures sédimentaires (rides de courant, laminations planes parallèles inclinées vers le SE, pédoturbation intense) indique qu'il s'agit de dépôts d'avant-plage,

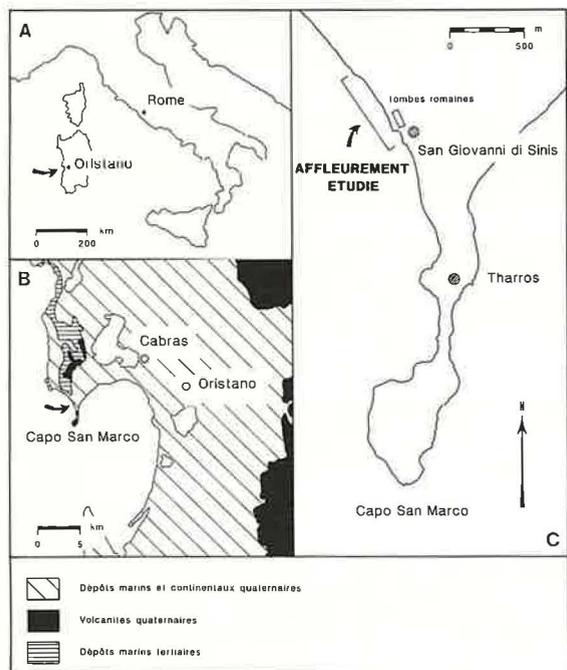


FIG. 1. — Situation de l'affleurement étudié.

FIG. 1. — Location of the studied outcrop.

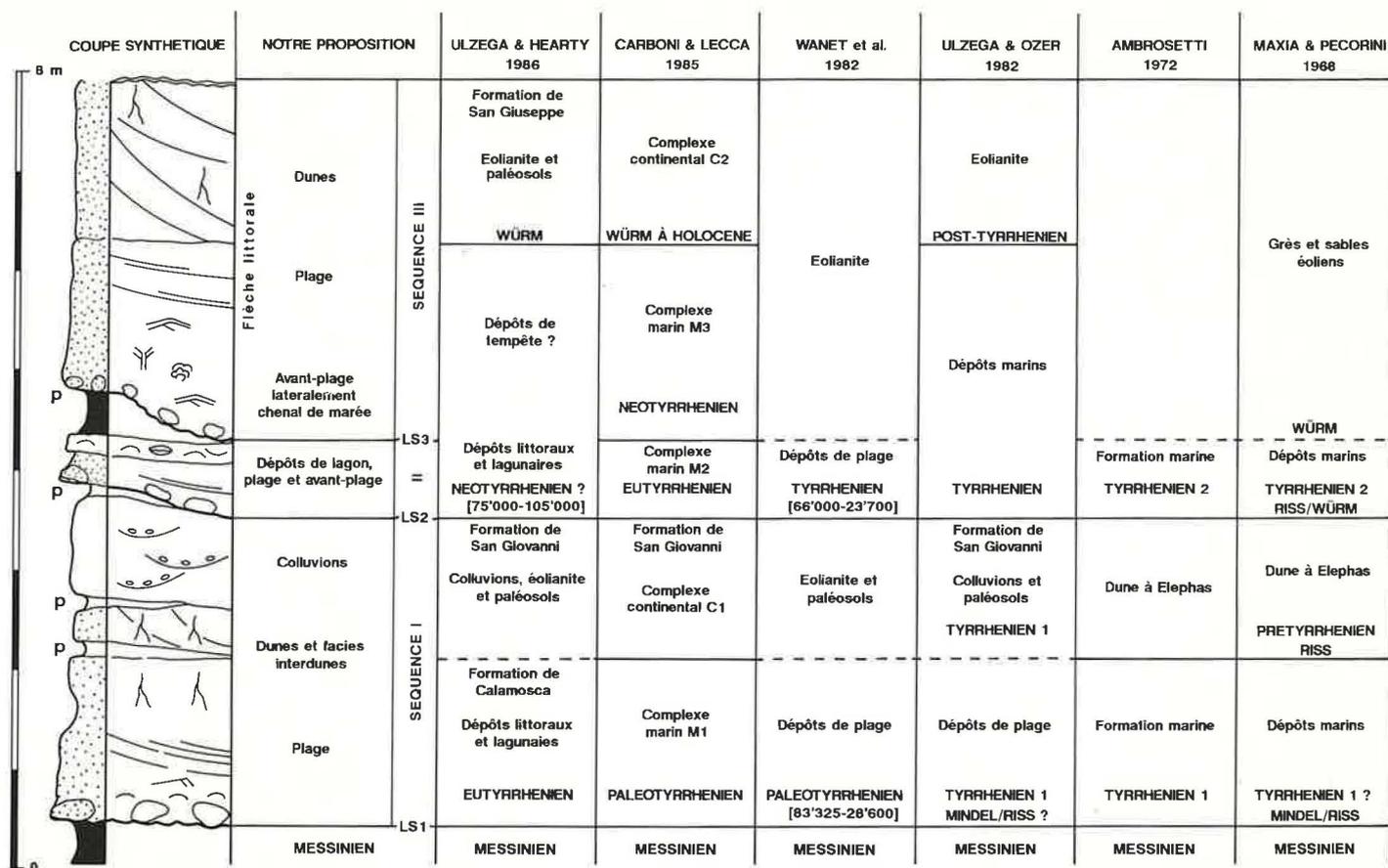


FIG. 2. — Interprétations sédimentologiques et attributions stratigraphiques des différents niveaux de l'affleurement de San Giovanni di Sinis. La coupe figurant à gauche est une synthèse des coupes A à F de la figure 3. La signification des symboles est donnée à la figure 3. Les nombres indiqués entre crochets correspondent aux âges obtenus à partir de la racémisation des acides aminés dans des tests de mollusques. Les lignes horizontales marquent les limites entre les principales entités identifiées par les auteurs. LS1, LS2 et LS3 : limites de séquence.

FIG. 2. — Sedimentological interpretations and stratigraphic attribution of the different levels of the San-Giovanni-di-Sinis outcrop. The section at left represents a compilation of sections A-F of figure 3 (symbols as in fig. 3). Numbers in brackets correspond to amino-acid-racemization ages performed on mollusk shells. Horizontal lines show limits between major units defined by the various authors. LS1, LS2 and LS3 are sequence boundaries.

de plage et de dunes côtières. Dans les dépôts éoliens [niv. 3, fig. 3; niv. C1 *sensu* Carboni et Lecca] s'interstratifient des niveaux rubéfiés décimétriques, constitués de quartz silteux et de rares bioclastes altérés. Ces niveaux décalcifiés peuvent être suivis sur plusieurs dizaines de mètres mais se pincet latéralement. Ils correspondent soit à des paléosols développés dans des dépressions interdunaires, soit à des paléosols formés durant des périodes d'accrétion éolienne réduite [Froidefond et Legigan, 1985].

Ces dépôts éoliens sont recouverts par des sables grossiers (niv. 4) entaillés localement par des surfaces d'érosion concaves sur lesquelles se concentrent des galets centimétriques («scour and fill»). Ces sables ont livré des débris de mammifères dont une molaire d'*Elephas* [Ambrosetti, 1972], mais contiennent encore des bioclastes marins altérés (foraminifères benthiques et fragments d'échinodermes). Ces dépôts ont été à juste titre interprétés comme des colluvions [Ulzega et Ozer, 1982] qui incorporent du matériel sédimentaire provenant des éolianites et paléosols sous-ja-

cents. Les niveaux 3 et 4 correspondent à la formation de San Giovanni.

Cette formation est entaillée par une deuxième surface d'érosion (notée LS2, fig. 3, coupe c-h;  $\delta_3$  dans le travail de Carboni et Lecca), irrégulière, inclinée vers le SE et disparaissant sous les dépôts de plage actuels à la hauteur du village (coupe i).

La surface d'érosion est surmontée par un conglomérat (niv. 5) polygénique dont la taille des éléments, souvent pluridécimétriques, diminue du NW vers le SE. La plupart des blocs et galets correspondent à des «grainstones/packstones» gréseux à foraminifères benthiques et présentent de fréquentes traces de pédogenèse : structure alvéolaire [Klappa, 1980], calcrétisation. Ces lithoclastes proviennent sans doute du démantèlement du niveau sous-jacent dont les couches superficielles ont été préalablement affectées par une pédogenèse active.

Ce conglomérat est associé à un «grainstone» à foraminifères benthiques et rares corallinacées caractérisé par des

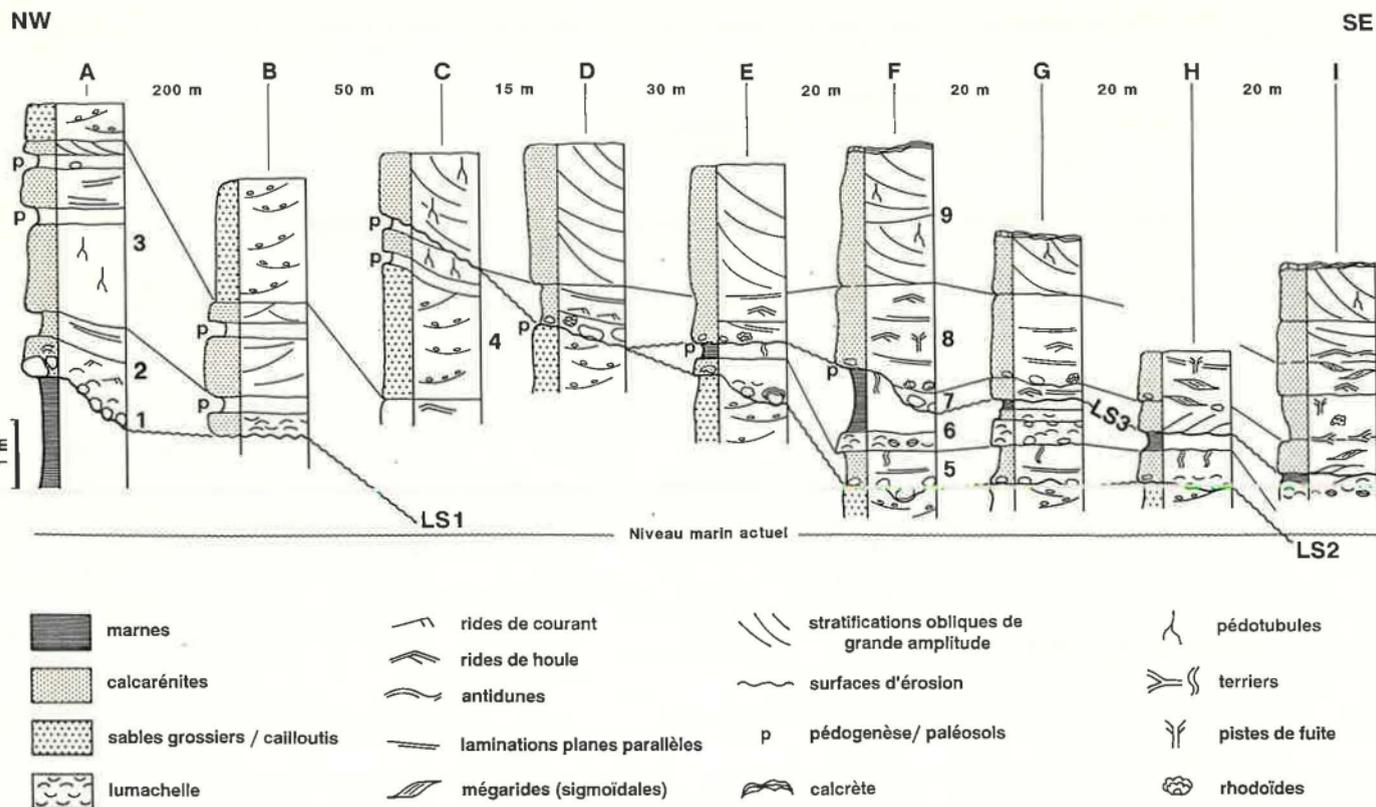


FIG. 3. – Description lithologique et sédimentologique de neuf coupes stratigraphiques échelonnées le long de la côte immédiatement au NW du village de San Giovanni di Sinis. Les numéros 1 à 9 correspondent aux différents niveaux décrits dans le texte. L'orientation des stratifications et des laminae a été respectée. Le profil des colonnes lithologiques correspond au profil d'érosion.

FIG. 3. – Lithological and sedimentological description of the nine sections studied along the coast just north-west of the village of San Giovanni di Sinis. Numbers 1 to 9 correspond to the levels mentioned in the text. Orientation of stratification and laminae has been respected. The outlines of the sections correspond to the erosion profiles.

FIG. 4. –

A) Base de la coupe F montrant que les laminations planes parallèles des faciès de plage (niveau 5) sont intensément recoupées par des terriers subverticaux. Ces terriers se développent sous la lumachelle à *Mytilus* (niveau 6 a) interprétée comme une moulière lagunaire. La lumachelle passe vers le haut à des vases silteuses à ostracodes contenant localement des charophytes.

B) Vue d'ensemble de la troisième séquence de dépôt (coupe I). La surface d'érosion et limite de séquence LS3 est bien visible à la base de la coupe. L'horizon intensément bioturbé est situé à la limite entre les niveaux 7 et 8 (la zone encadrée est détaillée sur la fig. 4 D). Les dunes éoliennes (niveau 9) surmontent sans faciès transitoires des trains de dunes hydrauliques à tendance sigmoïdale (flèches). Les antidunes mentionnées dans le texte et reportées sur la figure 3, coupe I, s'observent latéralement et n'apparaissent pas sur le cliché.

C) Surface d'érosion (LS3) entaillant les dépôts lagunaires surmontant la lumachelle à *Mytilus*. Ces dépôts sont affectés à proximité de la surface d'érosion par une pédogenèse active attestée par la présence de fissures circumgranulaires et de rhizolites (voir fig. 6 C).

D) Vue rapprochée du contact entre les niveaux 7 et 8 dans la coupe I. Le niveau intensément bioturbé (grande flèche, terriers ramifiés horizontaux) est interprété comme un intervalle de condensation. La présence de pistes de fuite (petite flèche) dans le niveau sus-jacent traduit une reprise rapide de la sédimentation.

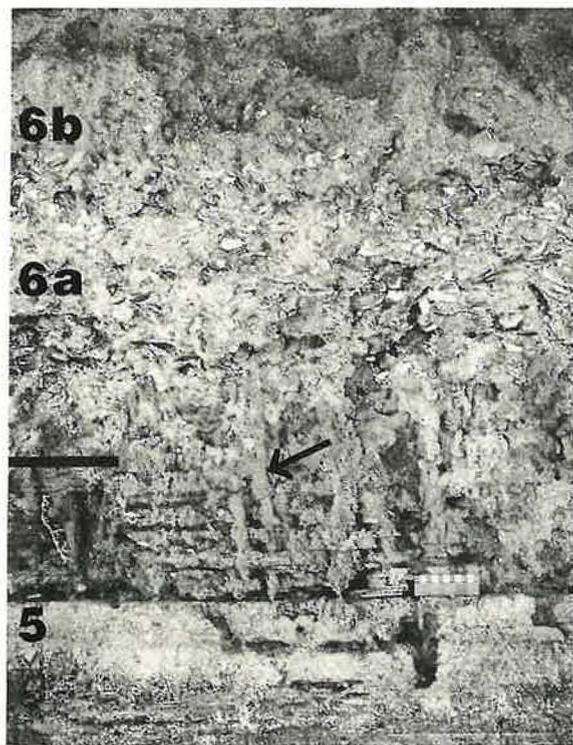
FIG. 4. –

A) Base of section F displaying planar beach laminations (level 5) strongly disrupted by vertical burrows. They are followed by a *Mytilus coquina* (level 6 a) attributed to a lagoonal environment, which then passes into silty ostracod wackestones locally containing charophytes (6 b).

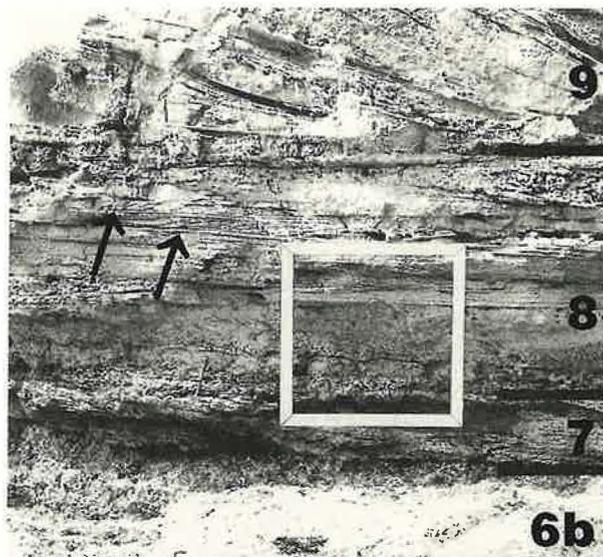
B) General view of the third depositional sequence in section I. The erosional surface representing sequence boundary LS3 is clearly visible at the base of the outcrop. An intensely bioturbated horizon marks the limit between levels 7 and 8 (outlined area enlarged in fig. 4 D). Eolian dunes (level 9) overlie, without any transitional facies, sigmoidal hydraulic dunes (arrows). The antidunes mentioned in the text and indicated in figure 3 (section I) are found laterally, but do not show on the photograph.

C) Erosion surface LS3 cuts into the lagoonal deposits which overlie the *Mytilus coquina*. Close to the erosion surface, pedogenesis is evidenced by circumgranular cracks and by rhizoliths (see fig. 6 C).

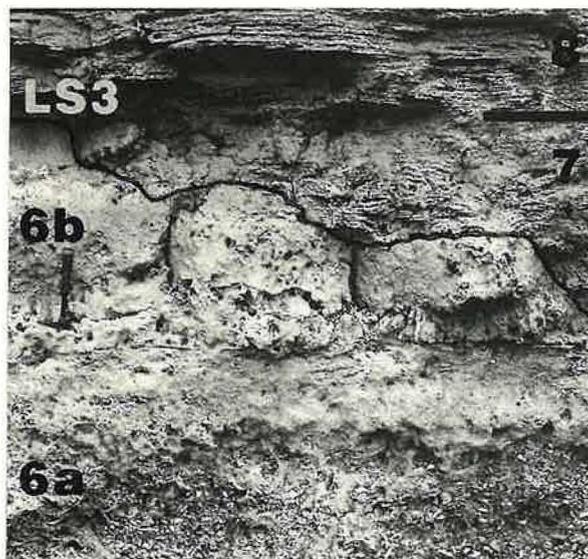
D) Close-up of the contact between levels 7 and 8 of section I. The strongly bioturbated horizon (large arrow: horizontally branching burrows) is interpreted as a condensed interval. The presence of escape structures (small arrow) in the overlying level suggests rapid return to high sedimentation rates.



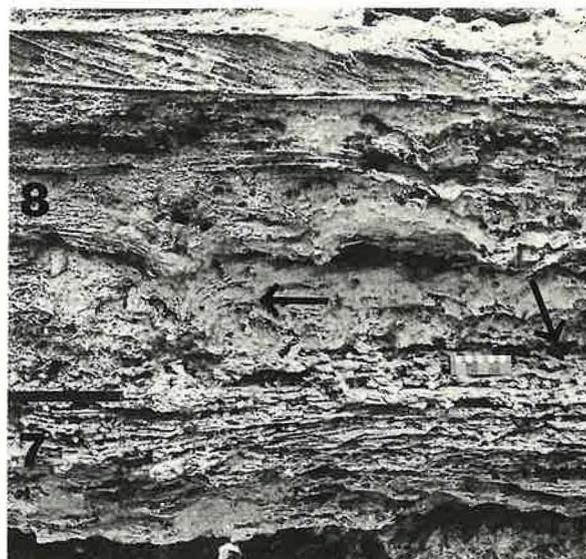
A



B



C



D

laminations planes parallèles subhorizontales ou légèrement inclinées vers le SE (niv. 5).

Les vingt derniers centimètres de ce niveau, interprétés comme un dépôt de plage, sont localement parcourus par un réseau dense de bioturbations verticales (fig. 4, A) différant des habituelles galeries de crabe de haut de plage. Il s'agit donc probablement d'une bioturbation qui s'est développée ultérieurement dans un milieu différent.

Cette interprétation est confirmée par la nature des faciès susjacentes (niv. 6, coupes e-h). La surface bioturbée est en effet surmontée par un «mudstone» gréseux à ostracodes à la base duquel se développe localement (coupe f, g et i) une remarquable lumachelle à *Mytilus* (fig. 4 A et C).

La disposition des coquilles, leur caractère monospécifique et la préservation fréquente d'individus complets indiquent clairement que ces accumulations ne sont pas dues à des courants mais qu'elles correspondent à des moulières développées *in situ*.

Dans l'Actuel, de telles biocénoses sont caractéristiques des milieux confinés [Guelorget et Perthuisot, 1983]. Il s'agit donc de dépôts mis en place dans une lagune. L'absence de fragments d'échinodermes, omniprésents dans les faciès sous et susjacentes (fig. 5), confirme le caractère confiné de ce niveau.

L'apparition de dépôts lagunaires sur des dépôts de plage ne peut s'expliquer que par le développement en direction du large d'un obstacle réduisant l'hydrodynamisme et limitant le renouvellement des masses d'eau littorales. Il est donc probable que la succession des faciès observés résulte de la migration d'une flèche sableuse ou de la création d'un cordon littoral.

La présence de fragments de tiges de charophytes dans les derniers décimètres des marnes à ostracodes témoigne d'une réduction rapide de l'influence marine. La partie sommitale des marnes a subi une surimpression pédogénique qui se manifeste par des pédotubules (fig. 6C) et des fissures circumgranulaires [Esteban et Klappa, 1984]. Cette

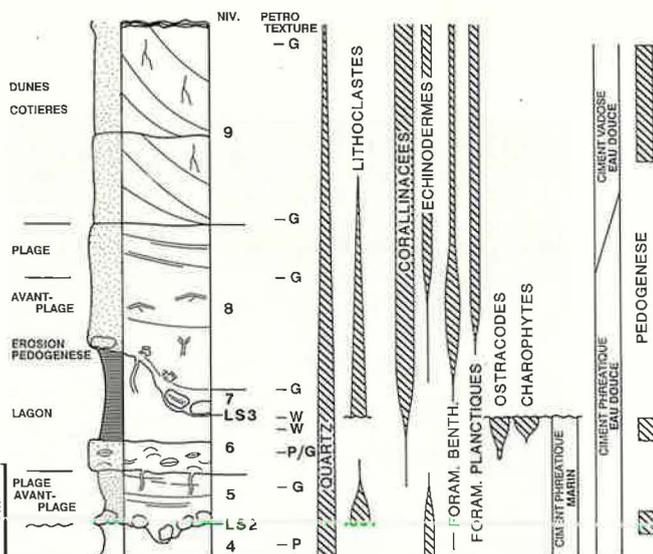


FIG. 5. — Evolution des principaux composants pétrographiques observés dans la coupe F (fig. 3). L'emplacement des échantillons est donné dans la colonne consacrée à la pétrotexture. Les numéros correspondent aux différents niveaux discutés dans le texte.

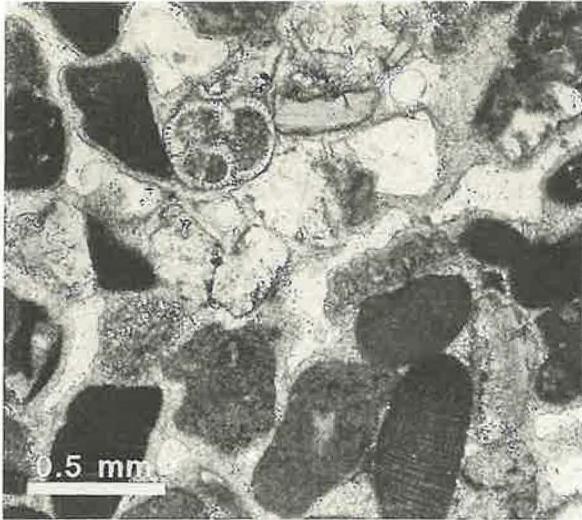
FIG. 5. — Evolution of principal petrographic components in section F (fig. 3). Sample locations are given in the petrotexture column. Numbers correspond to the different levels discussed in the text.

séquence régressive n'est visible que dans les coupes e, f, g et h.

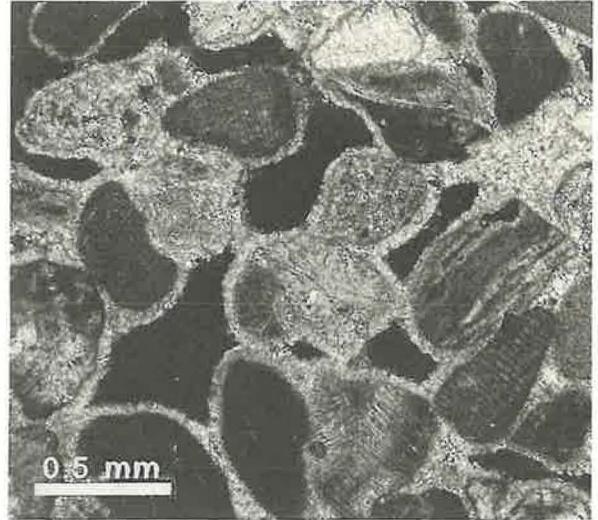
Ces dépôts lagunaires et émerifs sont entaillés par une troisième surface d'érosion irrégulière (LS3, fig. 4, C; surface  $\delta_6$  *sensu* Carboni et Lecca) dont l'altitude décroît en direction du SE et qui rejoint ou réactive la deuxième surface d'érosion (LS2) entre les coupes e et d. Ces deux surfaces délimitent clairement un prisme sédimentaire qui se biseaute vers le NW.

FIG. 6. —  
A et B) Calcarénite fine des dépôts éoliens (niveau 9) constituées essentiellement de fragments de corallinacées. Des foraminifères planctoniques bien préservés (!) y sont fréquents. Cette calcarénite est cimentée par des liserés isopaques de calcite équi-granulaire. Ceci indique que la plupart des pores étaient intégralement remplis d'eau douce. Seuls les pores de grande taille présentent les ciments ménisques et stalactitiques caractéristiques de la zone vadose (fig. 6 B : lumière polarisée).  
C) Micrite silteuse du niveau lagunaire (niveau 6) présentant une surimpression pédogénique. Les flèches indiquent un manchon rhizolitique dans lequel se développe une structure alvéolaire.  
D) Détail de la cimentation dans la lumachelle à *Mytilus* (base du niveau 6). On remarque la superposition de deux phases de cimentation : le ciment cryptocristallin qui tapisse irrégulièrement les parois des cavités intergranulaires présente de fortes analogies avec les ciments micritiques qui se développent dans l'Actuel en milieu phréatique ou vadose («beachrock») marin. Il est surmonté d'un liseré de calcite en «dent de chien» qui indique une cimentation phréatique d'eau douce. (qz : quartz; p : porosité intergranulaire résiduelle).  
E et F) Détail des calcarénites gréseuses du niveau 5, mettant en évidence (flèches) la présence d'un fin liseré micritique et fibreux isopaque (phréatique marin) recouvert par une seconde phase de cimentation constituée de calcite équi-granulaire (phréatique eau douce). (qz : quartz; p : porosité intergranulaire résiduelle).

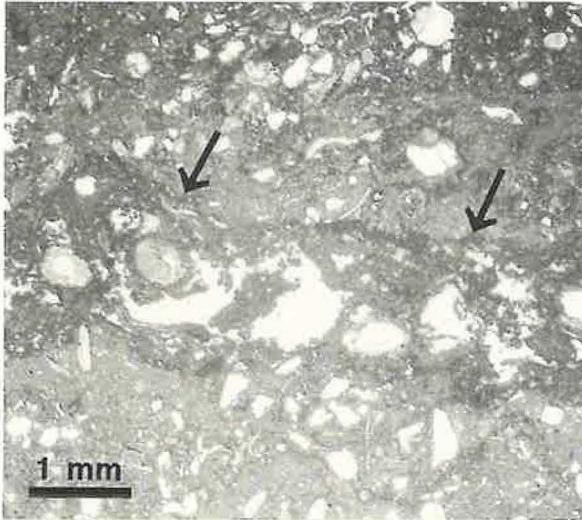
FIG. 6. —  
A and B) Fine-grained calcarenite of the eolian deposits (level 9) composed mainly of fragments of coralline algae. Well-preserved planktonic (!) foraminifera are common. This grainstone is cemented by isopachous rims of equigranular calcite, indicating that most pores were completely filled with fresh water. Only very large pores exhibit meniscus and gravitational cements characteristic of the vadose zone (fig. 6 B : crossed nicols).  
C) Silty micrite of the lagoonal facies (level 6) displaying pedogenetic overprint. Arrows indicate rhizolith with alveolar structure.  
D) Detail of cementation in the *Mytilus coquina* (base of level 6). Two phases of cementation are apparent : cryptocrystalline cement irregularly covers the walls of intergranular cavities and closely resembles micritic cements from Recent phreatic or vadose marine diagenetic environments (beachrock). This cement is overlain by dogtooth calcite spar implying a fresh-water phreatic cementation (qz : quartz; p : residual intergranular porosity).  
E and F) Detail of the sandy calcarenites of level 5. A thin isopachous layer of micrite and small needles (marine phreatic; arrows) is overlain by a second cement composed of equigranular calcite implying a fresh-water phreatic environment (qz : quartz; p : residual intergranular porosity).



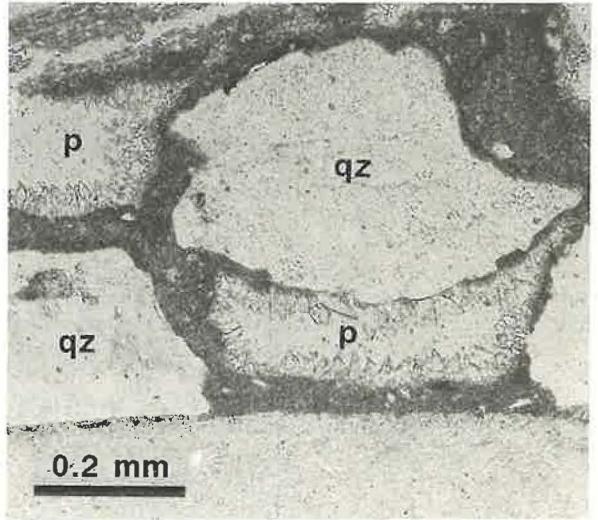
**A**



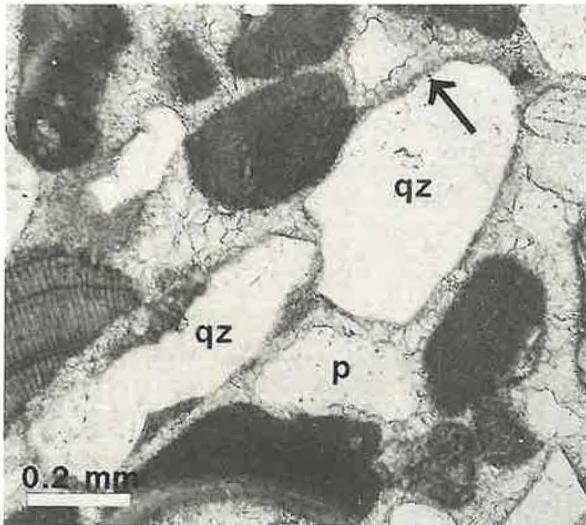
**B**



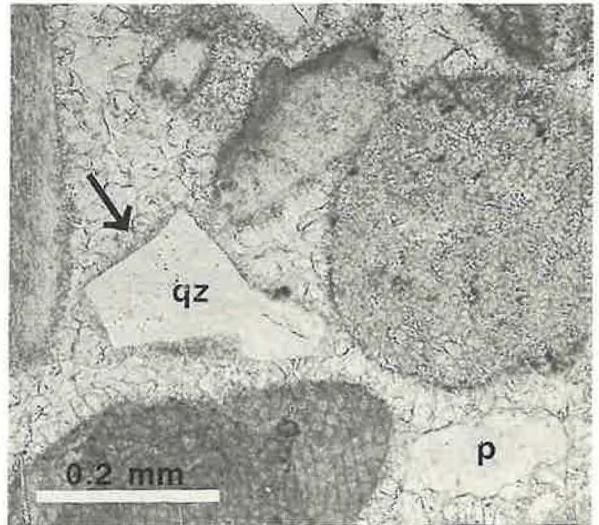
**C**



**D**



**E**



**F**

Les faciès susjacentes (niv. 7) présentent des variations latérales importantes. Dans les coupes d, e et f, la surface d'érosion est surmontée par un niveau conglomératique constitué de fragments de «*beachrock*» (souvent bioérodés) et de fragments provenant du démantèlement de vases à ostracodes et de la lumachelle à *Mytilus*. Vers le SE (coupes g, h et i), les galets se raréfient et font place à des calcarénites à lithoclastes micritiques et corallinacées. Ces calcarénites sont organisées en laminations planes subhorizontales (coupes f, g), rides de houle et trains de mégarides à tendance sigmoïdale dans les coupes h et i (fig. 4 B et D).

Cette succession latérale indique que l'on passe de faciès de plage, localement conglomératiques, à des faciès subtidiaux soumis à des courants de marée. Cette interprétation qui implique un approfondissement vers le SE est en accord avec la topographie sculptée par la troisième surface d'érosion.

Le retour à des dépôts marins de haute énergie est suivi du développement des corallinacées qui vont dès lors constituer l'essentiel des bioclastes. Un niveau tapissé de gros rhodoïdes (5 cm) se poursuit sur tout l'affleurement et constitue un bon horizon-repère. Les évaluations du taux de croissance des rhodoïdes varient considérablement dans la littérature mais la plupart des auteurs [Adey et Vassar, 1975; Bosence, 1983 a, b] s'accordent à penser que la formation de rhodoïdes pluricentimétriques nécessite plusieurs centaines voire plusieurs milliers d'années. Leur développement pourrait donc correspondre à une période à sédimentation réduite ou nulle. La présence dans la coupe i d'un faciès intensément bioturbé (fig. 4 B et D) situé dans le même niveau va dans le sens de cette interprétation.

Le niveau à rhodoïde est surmonté dans toutes les coupes par un «*grainstone*» constitué principalement de fragments de corallinacées (niv. 8). Ce «*grainstone*» présente des structures sédimentaires variant latéralement : les laminations planes subhorizontales des coupes d et e se poursuivent dans les coupes f et g mais sont fréquemment interstratifiées avec des rides de houle. Dans les coupes h et i, ces sables s'organisent en trains de mégarides d'amplitude décimétrique à pluridécimétrique, souvent bidirectionnelles et sigmoïdales. Cette séquence latérale traduit une augmentation de la bathymétrie du NW vers le SE et correspond au passage de faciès de plage à des faciès d'avant-plage ou de chenal de marée. La présence de piste de fuite à la base de ce niveau (coupe f et i; fig. 4 D) indique une sédimentation rapide.

L'affleurement se termine par un «*grainstone*» à fragments de corallinacées bien calibrés montrant des stratifications de grande amplitude, localement fortement inclinées (niv. 9). Ces stratifications sont recoupées par des surfaces de réactivation (coupe f) et sont parcourues par des bioturbations ramifiées. La granulométrie, l'amplitude et l'inclinaison des stratifications indiquent clairement qu'il s'agit de dunes côtières accumulées sous l'action d'un vent dominant du NW.

Dans la coupe i, la base des faciès éoliens montre des laminations ondulées de grande longueur d'onde (60 cm) qui passent latéralement à des laminations planes parallèles subhorizontales. Il s'agit probablement d'antidunes provoquées par le déferlement de vagues exceptionnelles (*washover*). Cette structure, souvent générée de manière

éphémère en laboratoire, a été rarement observée dans l'enregistrement sédimentaire côtier [Barwis et Hayes, 1985]. Sa préservation s'explique par le fait que les masses d'eau déferlant entre les dunes côtières lors des tempêtes s'infiltrant instantanément, après avoir réorganisé les particules sédimentaires.

Dans les coupes d, e, f et g, les dunes progradent normalement sur des faciès de plage mais surmontent sans faciès transitoire les dépôts d'avant-plage ou de chenal de marée des coupes h et i. Cette anomalie dans la succession verticale des faciès sera abordée plus loin.

On notera enfin (fig. 3) que la direction de plongement des stratifications éoliennes coïncide avec la direction de plongement des stratifications de plage ou, en d'autres termes, que l'accrétion éolienne se fait dans le sens de progradation des faciès de plage. Cette coïncidence, jointe au fait que les variations latérales de faciès traduisent un approfondissement du NW vers le SE, indique clairement que les niveaux 7 à 9 correspondent à une flèche littorale migrant vers le SE.

## B) Pétrographie

La composition pétrographique (fig. 5) varie peu dans les niveaux calcarénitiques. Les microfaciès des dépôts éoliens ne se distinguent pas clairement des faciès de plage ou d'avant-plage. Les bioclastes constituent l'essentiel des particules qu'on y observe et des foraminifères benthiques et planctoniques (!) très bien préservés y sont fréquents (fig. 6 A). Seuls les dépôts lagunaires montrent un changement pétrographique et faunique radical.

L'examen des ciments apporte des informations plus intéressantes. En dessous de la surface d'érosion LS3, on observe généralement deux générations de ciments (fig. 6 D-F). La première se présente sous forme de fins liserés micritiques et fibreux et témoigne – par comparaison morphologique avec les ciments qui se développent dans l'Actuel – d'une première phase de lithification en milieu phréatique marin. La deuxième génération de ciments est constituée de cristaux scalénoédraux de calcite tapissant uniformément les cavités résiduelles. Cette deuxième génération indique un milieu phréatique d'eau douce [Pierson et Shinn, 1985].

Au dessus de la surface d'érosion (LS3) les ciments marins disparaissent et on ne retrouve que la deuxième génération de ciment. Celle-ci forme des liserés isopaques constitués de cristaux calcitiques équigranulaires (fig. 6 A, B). Des ciments ménisques et stalactitiques apparaissent dans les dépôts éoliens (niv. 8), mais ne se développent que dans des pores intergranulaires de grande taille. L'apparition des ciments anisotropes marque la limite entre la zone phréatique et la zone vadose et indique qu'une nappe d'eau douce a stagné à l'altitude du contact entre les faciès de plage et les faciès éoliens.

## II. – DISCUSSION

L'analyse qui précède permet de reconstituer la succession des événements sédimentaires le long d'un profil NW-SE (fig. 7) et de mettre en évidence trois séquences

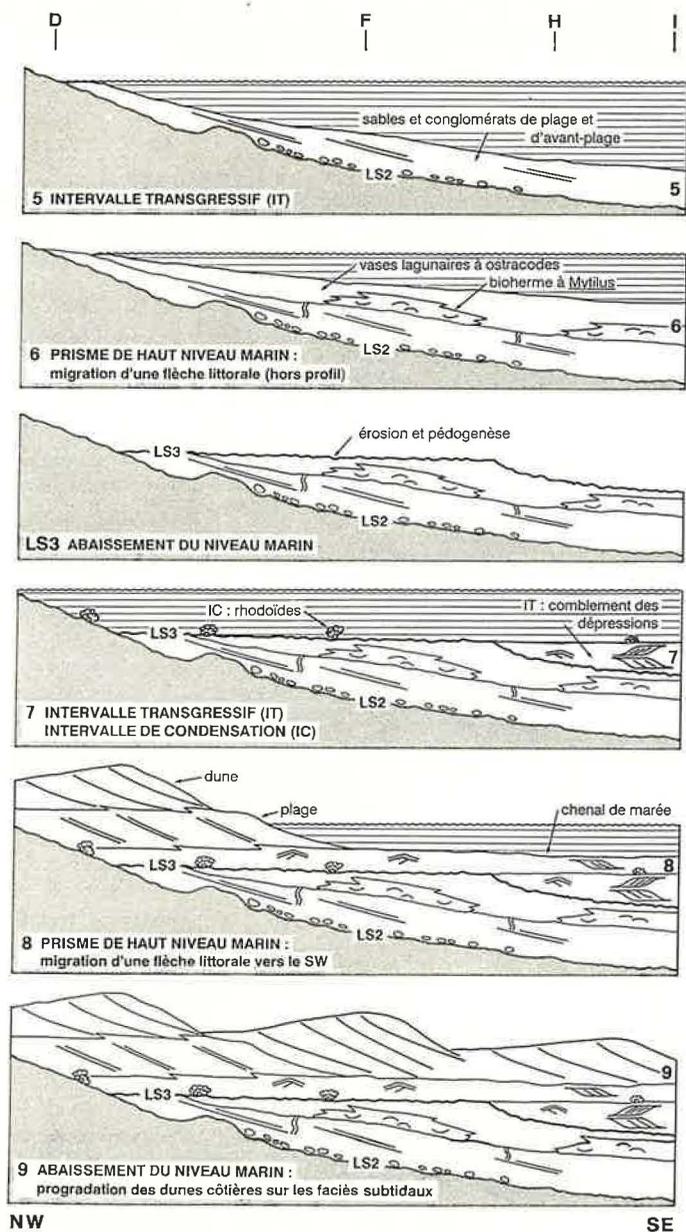


FIG. 7. – Reconstitution des événements eustatiques et sédimentaires basée sur l'analyse des deux dernières séquences de dépôts (II et III). Le substrat figuré en gris correspond à la première séquence de dépôt (niveau 1 à 4, fig. 3). Les surfaces d'érosion majeures LS2 et LS3 représentent des limites de séquence. Les numéros correspondent aux niveaux stratigraphiques décrits en détail dans le texte et la figure 3. L'emplacement approximatif des coupes D à I figure en haut de ce schéma.

FIG. 7. – Reconstitution of the eustatic and sedimentary evolution based on the analysis of depositional sequences II and III. The substrate (stippled) corresponds to the first depositional sequence (levels 1 to 4, fig. 3). The major erosion surfaces LS2 and LS3 are sequence boundaries. Numbers correspond to the stratigraphic levels described in the text and in figure 3. Approximate positions of section D to I are indicated at top of figure.

régressives (plus exactement « bathydécroissantes ») distinctes.

Ces trois séquences débutent toutes par des faciès d'avant-plage et se terminent par des faciès émergifs représentés par des dunes côtières ou des marais littoraux. Elles sont séparées par deux surfaces d'érosion (LS2 et LS3, fig. 3) qui entaillent irrégulièrement les séquences sous-jacentes et définissent la topographie initiale pour la séquence suivante. L'agencement latéral et vertical des faciès dans la deuxième (niveaux 5 et 6) et la troisième séquence (niveaux 7 à 9) est imputable à la migration d'une flèche sableuse.

En terme de stratigraphie séquentielle, ces trois entités doivent être considérées comme des séquences de dépôts reflétant des variations eustatiques.

De ce point de vue la dernière séquence régressive (niv. 6 à 9, fig. 3) mérite d'être examinée de plus près : l'horizon à rhodoïdes qui passe latéralement à un horizon intensément bioturbé (coupe i, fig. 4 A et D) pourrait être considéré comme un intervalle de condensation [sensu Van Wagoner *et al.*, 1988] qui correspondrait au maximum transgressif. Les calcarénites à stratifications sigmoïdales, rides de houle et pistes de fuite (niv. 8, fig. 4 D) qui lui font suite traduisent une reprise rapide de la sédimentation. Elles pourraient être considérées – à une échelle réduite – comme la base d'un prisme de haut niveau marin (PHN). Enfin la superposition anormale de dépôts supratidaux (« washover » et dunes) sur des faciès subtidaux (avant-plage ou chenal de marée), signalée dans la coupe i, confirmerait que l'essentiel de la sédimentation s'effectue lorsque le plan d'eau commence à s'abaisser. La même superposition a été signalée par Jedoui *et al.* [1987] dans le Tyrrhénien de Hergla (Tunisie) où des dunes littorales surmontent directement des dépôts d'avant-plage.

La troisième séquence de dépôts présente donc à une échelle réduite les cortèges sédimentaires qui caractérisent l'enregistrement d'un cycle eustatique à l'échelle d'un bassin sédimentaire : surface d'érosion (LS3), intervalle transgressif (IT), intervalle condensé (IC) prisme de haut niveau marin (PHN). Cette convergence, déjà signalée par Strasser *et al.* [1989] confirme que les concepts de la stratigraphie séquentielle qui décrivent l'agencement des corps sédimentaires en réponse à des variations eustatiques à l'échelle des marges continentales sont également applicables à l'analyse de systèmes sédimentaires littoraux de dimension réduite.

Les dépôts analysés dans ce travail résultent de trois cycles eustatiques au cours desquels le niveau marin a approximativement atteint la même côte, en admettant une activité tectonique réduite au cours du Pléistocène supérieur. Si la localisation de l'échantillon daté par Ulzega et Hearty [1986] est exacte, la base de la troisième séquence correspondrait au Néotyrrhénien. Il s'agirait du dernier épisode transgressif qui précède l'abaissement considérable du niveau marin contemporain de la glaciation wurmienne.

La courbe de paléotempérature la plus récente [Martinson *et al.*, 1987], qui confirme la présence de trois maxima entre 130 000 et 70 000 ans déjà pressentis par Shakleton et Opdyke [1973], situe cet épisode aux environs de 80 000 ans (fig. 8). Les deux épisodes transgressifs sous-jacents mis en évidence dans ce travail pourraient par conséquent,

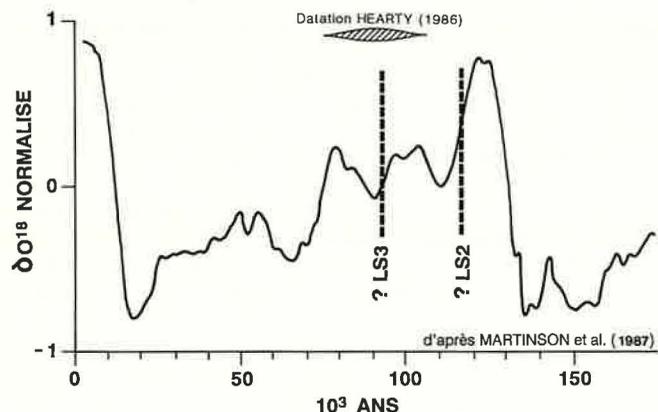


FIG. 8. — Evolution des paléotempératures du Pléistocène supérieur à nos jours d'après Martinson *et al.* [1987]. La datation d'Ulzega et Hearty basée sur la racémisation des acides aminés est reportée avec sa marge d'erreur. Les limites de séquences LS2 et LS3 pourraient correspondre aux deux phases majeures de refroidissement (abaissement du niveau marin) enregistrées durant l'interglaciaire Riss-Würm.

FIG. 8. — Evolution of paleotemperatures from the Upper Pleistocene to Present according to Martinson *et al.* [1987]. Amino-acid-racemization dates of Ulzega and Hearty are shown with error bar. Sequence boundaries LS2 and LS3 may correspond to the two major cooling events (sea-level drops) during the Riss-Würm interglacial.

soit représenter l'enregistrement sédimentaire des deux premiers maxima eustatiques tyrrhéniens (100 000 et 123 000 ans), soit ne représenter que l'un de ces deux maxima (100 000 ou 123 000 ans) et un événement eustatique plus ancien, anté-tyrrhénien. La première interprétation qui re-

joint partiellement celle d'Ulzega et Hearty [1986] est la plus séduisante, mais elle devrait évidemment être confirmée par des datations complémentaires.

### III. — CONCLUSIONS

Les affleurements du Pléistocène supérieur de la côte de San Giovanni di Sinis présentent une stratigraphie complexe dont le déchiffrement est rendu difficile par la grande variabilité latérale des faciès. L'interprétation sédimentologique détaillée de chaque niveau en différents points de l'affleurement permet de définir les environnements de dépôts et, partant, de détecter les superpositions de faciès imputables à des mouvements eustatiques. Cette approche a permis de mettre en évidence trois séquences séparées par des surfaces d'érosion importantes. Ces trois séquences se sont développées durant trois phases de haut niveau marin qui pourraient correspondre aux trois maxima thermiques mis en évidence sur l'ensemble de la planète durant le dernier interglaciaire.

Les concepts de la stratigraphie séquentielle et la terminologie qui en découle semblent par ailleurs pouvoir être utilisés avec bénéfice pour l'analyse détaillée des dépôts littoraux quaternaires.

*Remerciements.* — Les auteurs tiennent à remercier le Prof. S. Barca de l'Université de Cagliari pour les précieux renseignements qu'il leur a fournis, leurs collègues A. Waehry, qui a participé au travail de terrain et relu le manuscrit, et J. Metzger, qui a redessiné les figures. Les auteurs remercient également les Prof. J.J. Blanc, P. Sanlaville et un rapporteur anonyme pour leurs judicieuses critiques. Ce travail a été subventionné par le Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique (projet 2000.5322).

### Références

- ADEY W.H. & VASSAR J.M. (1975). — Colonisation, succession and growth rates of tropical crustose coralline algae (Rhodophyta, Cryptonemialcs). — *Phycologia*, **14**, 55-69.
- AMBROSETTI P. (1972). — L'elefante fossile della Sardegna. — *Boll. Soc. Geol. It.*, **91**, 127-131.
- BARWIS J.H. & HAYES M.O. (1985). — Antidunes on modern and ancient washover fans. — *J. Sediment. Petrol.*, **55/6**, 907-916.
- BOSENCE D. W. J. (1983a). — Description and classification of rhodoliths (rhodolites, rhodoids). In : PERYT T. Ed., Coated grains — Springer Verlag, Berlin, 217-224.
- BOSENCE D. W. J. (1983b). — The occurrence and ecology of Recent rhodoliths. A review. In : PERYT T. Ed., Coated grains — Springer Verlag, Berlin, 225-242.
- CALOI L., KOTSAKIS T., PALOMBO M.R. & PETRONIO C. (1980). — Il giacimento a vertebrati del Pleistocene superiore di San Giovanni di Sinis (Sardegna occidentale). — *Rend. Sci. Fis. mat. e nat. Lincei*, **LXIX**, 185-197.
- CARBONI S. & LECCA L. (1985). — Osservazioni sul pleistocene medio-superiore della penisola del Sinis (Sardegna occidentale). — *Boll. Soc. Geol. It.*, **104**, 459-477.
- CERCHI A., MARINI A., MURRU M. & ROBBA E. (1978). — Stratigrafia e paleoecologia del Miocene superiore della Penisola del Sinis (Sardegna occidentale). — *Riv. Paleont. Strat.*, **84/4**, 793-1036.
- ESTEBAN M. & KLAPPA C.F. (1984). — Subaerial exposure environments. In : SHOLLE P. A. Ed., Carbonate depositional environments. — *AAPG Mem.*, **33**, 2-92.
- FROIDEFOND J.-M. & LEGIGAN P. (1985). — La Grande Dune du Pilat et la progression des dunes sur le littoral aquitain. — *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine*, **38**, 69-79.
- GUELORGET O. & PERTHUISOT J.-P. (1983). — Le domaine paraliq expressions géologiques, biologiques et économiques du confinement. — *Trav. Lab. Géol. Paris*, **16**.
- JEDOUY Y., DAVAUD E. & STRASSER A. (1987). — Sédimentation et diagenèse du cordon littoral tyrrhénien de la sebkha de Halk el Menzel (Hergla, Tunisie). — *Notes Serv. Géol. Tunisie*, **55**, 45-74.
- KLAPPA C.F. (1980). — Rhizoliths in terrestrial carbonates : classification, recognition and significance. — *Sedimentology*, **27**, 613-629.
- MARTINSON D.G., PISIAS N.G., HAYS J.D., IMBRIE J., MOORE T. & SHACKLETON N.J. (1987). — Age dating and the orbital theory of the Ice ages : development of a high-resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy. — *Quat. Res.*, **27**, 1-29.
- MAXIA C. & PECORINI G. (1968). — Il Quaternario della Sardegna. — *Atti X Congr. Int. St. Sardi*, 59-69.
- PECORINI G. (1954). — Le dune fossili della Nurra di Alghero. — *Rend. Acc. Linc.*, **8a**, **16**, 735-741.

- PIERSON B.J. & SHINN E.A. (1985). – Cement distribution and carbonate mineral stabilization in Pleistocene limestones of Hogsty reef, Bahamas. In : SCHNEIDERMANN N. & HARRIS P.M. Eds., Carbonate cements. – *SEPM Spec. Publ.*, **36**, 153-168.
- SHACKLETON N.J. & OPDYKE N.D. (1973). – Oxygen Isotope and palaeomagnetic stratigraphy of Equatorial Pacific core V28-238 : oxygen isotope temperatures and ice volumes on a  $10^5$  year and  $10^6$  year scale. – *Quat. Res.*, **3**, 39-55.
- STRASSER A., DAVAUD E., KINDLER P. & MARTINI R. (1989). – Transgressive-regressive depositional sequences in Upper Pleistocene (Tyrrhenian) coastal sediments of Sardinia, Italy. – Abstracts, X IAS Regional Meeting, Budapest.
- ULZEGA A. & HEARTY P.J. (1986). – Geomorphology, stratigraphy and geochronology of late Quaternary marine deposits in Sardinia. – *Z. Geomorph. N.F.*, Suppl. Bd. **62**, 119-129.
- ULZEGA A. & OZER A. (1982). – Comptes-rendus de l'excursion table ronde sur le Tyrrhénien de Sardaigne. – INQUA Guidebook, Cagliari, 112 p.
- VAN WAGONER J.C., POSAMENTIER H.W., MITCHUM R.M., VAIL P.R., SARG J.F., LOUTIT T.S. & HARDENBOL J. (1988). – An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions. In : WILGUS C.K. et al., Eds., Sea-level changes : an integrated approach. – *SEPM Spec. Publ.*, **42**, 39-69.
- WANET P., LEONE F., OZER A. & ULZEGA A. (1982). – Tentative de datation par racémisation des acides aminés de coquilles provenant du Tyrrhénien de Sardaigne. – *Ren. Sem. Fac. Sci.*, **LII**, 159-167.