

LA LIGNE DE RIVAGE DU DERNIER INTERGLACIAIRE AUTOUR DE LA PÉNINSULE DE BASSE CALIFORNIE ET EN SONORA (MEXIQUE) : RECONNAISSANCE GÉNÉRALE ET IMPLICATIONS NÉOTECTONIQUES

LUC ORTLIEB

O.R.S.T.O.M. 24, rue Bayard, 75008 Paris

RÉSUMÉ

Par une étude extensive des terrasses et dépôts marins quaternaires du golfe de Californie et de la côte pacifique de la péninsule de Basse Californie, il est possible d'identifier, dans de très nombreux cas, ceux qui correspondent au haut niveau marin du dernier interglaciaire. Dans chacune des localités on a tenté de retrouver la position du niveau moyen de la mer à l'époque du maximum de la transgression de 125-120 000 ans, à l'aide de critères géomorphologiques, sédimentologiques ou paléo-écologiques; ensuite la position de ce paléo-niveau marin a été mesurée par rapport au niveau moyen de la mer actuel. La comparaison des altitudes du paléo-niveau marin de 125-120 ka, dans plus de 120 sites, met ainsi en évidence la faiblesse générale des déformations verticales qui ont affecté cette région au cours du Quaternaire supérieur, malgré l'existence de mouvements latéraux importants entre les deux rives du golfe. Dans trois zones d'extension restreinte, des mouvements de surrection d'origine tectonique ou volcanotectonique peuvent néanmoins être déduits de la présence, à plus de +20 m d'altitude de la ligne de rivage pleistocène la plus récente.

MOTS-CLÉS : Mexique — Golfe de Californie — Quaternaire — Niveaux marins — Néotectonique.

ABSTRACT

LAST INTERGLACIAL SHORELINE AROUND BAJA CALIFORNIA PENINSULA AND IN SONORA (MEXICO) :
GENERAL RECONNAISSANCE AND NEOTECTONIC IMPLICATIONS

Through an extensive study of Quaternary marine deposits and terraces along the coast of the gulf of California and of the Pacific side of Baja California peninsula, it is possible to distinguish, in most of the localities, those which correspond to the high sea stand of the last interglacial. In every locality, the position of the mean sea level coeval with the transgression maximum at 125-120 ka, was determined on basis of geomorphic, sedimentologic and paleoecologic criteria; then, the position of this paleo-sea level has been measured relative to the present mean sea level. The comparison of present elevations of the 125-120 ka sea level, in more than 120 localities, thus shows that the whole region experienced little vertical deformations during the late Quaternary, although lateral displacement has been occurring between the opposite coasts of the gulf. In three restricted areas, uplifts of tectonic or volcanotectonic origins are inferred from the presence at more than +20 m of the most recent Pleistocene shoreline.

KEY WORDS : Mexico — Gulf of California — Quaternary — Sea level — Neotectonics.

RESUMEN

En el marco de un estudio a gran escala de terrazas y depósitos marinos cuaternarios en las costas del golfo de California y del lado pacífico de la península de Baja California, ha sido posible identificar, en la mayoría de los casos, los que correspondían al alto nivel marino del último interglacial. En cada localidad se buscó la posición del nivel medio del mar durante el máximo de la transgresión de 125-120 000 años, utilizando criterios geomorfológicos, sedimentológicos y paleoecológicos; luego se midió la altura de este paleo-nivel marino con respecto al nivel medio

del mar actual. La comparación de las alturas del paleo-nivel marino de 125-120 ka, en más de 120 localidades, muestra que han sido débiles las deformaciones verticales en esta región durante el Cuaternario superior, no obstante la existencia de movimientos laterales importantes entre las riberas del golfo. En tres zonas de extensión restringida, movimientos de surrección de origen tectónico o volcano-tectónico, pueden inferirse de la presencia, a una altura superior a +20 m, de la línea de costa pleistocénica más reciente.

PALABRAS CLAVES : México — Golfo de California — Cuaternario — Niveles marinos — Neotectónica.

РЕЗЮМЕ

БЕРЕГОВАЯ ЛИНИЯ ПОСЛЕДНЕГО МЕЖЛЕДНИКОВЬЯ ВОКРУГ НИЗКО-КАЛИФОРНИЙСКОГО ПОЛУОСТРОВА И СОНОРИЙСКОЙ ОБЛАСТИ (МЕКСИКА)

В результате подробного исследования четвертичных морских отложений и террас калифорнийского залива и Тихоокеанского побережья низко-калифорнийского полуострова, можно очень часто определять те, что соответствуют высшему морскому уровню последнего межледниковья. В каждой местности, постарались познать положение среднего морского уровня в период максимальной трансгрессии от 125 по 120 тыс. лет до н.э. с помощью геоморфологических, седиментологических и палеоэкологических критерий; потом, положение этого древнего морского уровня измеряли по отношению к настоящему среднему уровню моря. Из сравнения высот древнего морского уровня — 125-120 тыс. лет тому назад — в больше 120 местностей можно выявлять общую слабость тех вертикальных деформаций, что оказали влияние на эту область в течение верхнего четвертичного периода, несмотря на наличие важных боковых движений между обеими берегами залива. Однако, в трех небольших районах, восходящие движения от тектонического или вулкано-тектонического происхождения можно выводить от наличия позднейшей плейстоценовой береговой линии на высоте, больше чем +20 м.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА : Мексика — Калифорнийский залив — Четвертичный период — Морские уровни — Неотектоника.

INTRODUCTION

Certaines zones côtières de Basse Californie et de Sonora présentent, comme en Californie, des terrasses marines qui témoignent de mouvements verticaux quaternaires parfois importants. Ces terrasses, constituées par des accumulations de sédiments littoraux et/ou par des plates-formes d'abrasion marine, ont été formées lors des périodes de haut niveau marin du Pleistocène. On sait que les variations climatiques pleistocènes, et en particulier durant le dernier million d'années, ont induit des fluctuations du volume des eaux océaniques, et donc du niveau de la mer. Ainsi le niveau marin est supposé avoir atteint une cote comparable, à quelques mètres près, d'un interglaciaire à l'autre, c'est-à-dire une position voisine de l'actuelle. Durant les périodes glaciaires, qui ont duré chacune beaucoup plus longtemps que les périodes interglaciaires, le niveau marin se situait à plusieurs dizaines de mètres sous le zéro actuel. Les terrasses marines émergées, qui enregistrent donc la trace d'un plan de référence du passé, permettent ainsi de mettre en évidence des mouvements de surrection de la zone littorale, et éventuellement d'en évaluer les taux.

Dans le nord-ouest mexicain, région tectoniquement active où passe la limite entre les plaques Amérique du Nord et Pacifique, une étude systématique des terrasses marines pleistocènes a été entreprise récemment dans le but de préciser l'amplitude et la distribution des mouvements verticaux accompagnant l'ouverture du golfe de Californie et la translation vers le NW de la péninsule de Basse-Californie (ORTLIEB, 1978a; 1979c; 1980; en prép.). La méthode consiste à comparer les positions des anciens niveaux moyens de la mer contemporains de chacune des terrasses littorales. Dans ce travail on s'intéressera à la terrasse du dernier interglaciaire, pour plusieurs raisons. Tout d'abord, cette terrasse, généralement la plus basse, est largement plus représentée que les terrasses plus élevées et plus anciennes. D'autre part, la meilleure préservation des restes de la dernière transgression permet d'établir avec plus de précision l'altitude du paléo-niveau marin correspondant. Enfin, la terrasse du dernier interglaciaire est la seule pour laquelle on dispose, actuellement, de datations radiométriques.

Dans cette étude on s'attachera à présenter l'ensemble des cotes altimétriques atteintes par le paléo-niveau marin du dernier interglaciaire, telles

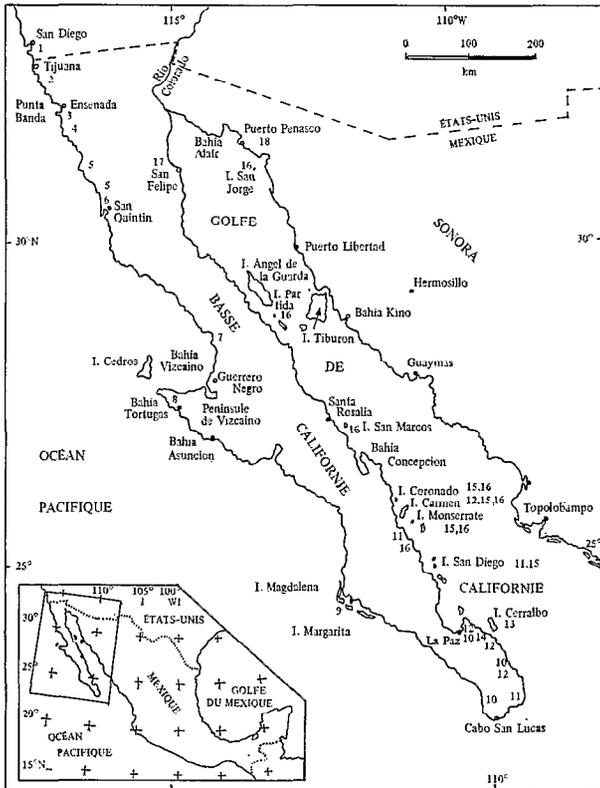


FIG. 1. — Localisation géographique de la région étudiée, et indication des zones ayant donné lieu à des travaux antérieurs, par d'autres auteurs, et qui ont été effectivement utilisés dans la détermination de l'altitude actuelle de la trace de l'ancien niveau de la mer lors de la transgression du dernier interglaciaire (voir fig. 3). 1 : KERN, 1977 ; 2 : VALENTINE et ROWLAND, 1969 ; 3 : EMERSON, 1956 ; 4 : ADDICOTT et EMERSON, 1959 ; 5 : ORME, 1972 ; 6 : JORDAN, 1926 ; 7 : WOODS, 1980 ; 8 : EMERSON, 1980 ; 9 : OMURA *et al.*, 1979 ; 10 : HAMMOND, 1954 ; 11 : SQUIRES, 1959 ; 12 : HERTLEIN, 1957 ; 13 : EMERSON, 1960 ; 14 : DOWLEN et MINCH, 1973 ; 15 : EMERSON et HERTLEIN, 1964 ; 16 : ANDERSON, 1950 ; 17 : WALKER et THOMPSON, 1968 ; 18 : HERTLEIN et EMERSON, 1956.

qu'elles ont été déterminées tout au long de la côte pacifique de Basse-Californie et sur les rivages du golfe de Californie (fig. 1). Sont pris en considération à la fois les résultats d'observations personnelles non encore publiés et, après critique, les informations publiées antérieurement par d'autres auteurs (fig. 1), ou par moi-même.

L'étude des déformations verticales, au cours d'une période telle que le Quaternaire supérieur, de la trace (paléo-ligne de rivage) d'un plan de référence originellement horizontal (le niveau moyen de la mer d'il y a 125 000 ans), suppose que soient satisfaites deux conditions essentielles. Premièrement, les restes de paléo-lignes de rivages étudiés, entre lesquels

on établit des corrélations latérales, doivent être, si possible, datés, ou tout au moins, synchrones (même interglaciaire, ou même phase de haut niveau marin au cours d'un interglaciaire). D'autre part, les altitudes mesurées de cette ligne de rivage doivent concerner un même niveau, en l'occurrence le paléo-niveau moyen de la mer, et doivent être rapportées à un niveau de référence actuel bien déterminé (le niveau marin moyen actuel). Dans les cas où ces conditions ne peuvent être pleinement remplies, il est important de mentionner les approximations faites et d'évaluer les marges d'incertitude qui en découlent. Aussi avant de présenter la synthèse des connaissances actuelles sur l'altitude de la ligne de rivage du dernier interglaciaire, il est nécessaire, d'une part, de faire le point des données chronologiques disponibles dans la région (en y incluant l'extrême sud-ouest de la Californie) et des critères utilisés pour différencier la terrasse du dernier interglaciaire de celles qui sont plus anciennes, et d'autre part, de préciser comment ont été déterminées, sur le terrain, les cotes du paléo-niveau moyen de la mer considéré dans chacune des localités.

GÉOCHRONOLOGIE DES DÉPÔTS MARINS DU DERNIER INTERGLACIAIRE

Cadre chronologique des variations du niveau marin au Quaternaire supérieur

Dans de nombreuses régions côtières du monde, des témoins du maximum de la transgression du dernier interglaciaire sont observés à quelques mètres au-dessus du niveau marin actuel. Ces dépôts littoraux fossiles émergés et ces formes d'abrasion marine ancienne suggèrent que la période de haut niveau marin fut limitée dans le temps à quelques milliers d'années, et que durant ce laps de temps, le niveau de la mer demeura stable. Le fait que cette ligne de rivage soit souvent émergée, même dans les régions ne présentant aucun indice d'activité tectonique ou isostatique, s'explique par l'existence d'un niveau océanique eustatiquement plus élevé que l'actuel. Diverses études sédimentologiques, paléo-écologiques isotopiques, etc., tendent à prouver que, effectivement, les températures étaient légèrement supérieures à ce qu'elles sont actuellement, durant le dernier interglaciaire, et donc que le niveau de la mer devait être un peu plus haut que le zéro actuel (EMILIANI, 1955; MESOLELLA *et al.*, 1969; SHACKLETON et OPDYKE, 1973; KU *et al.*, 1974; MARSHALL et THOM, 1976; SHACKLETON et OPDYKE, 1976; BENDER *et al.*, 1979; HARMON *et al.*, 1981).

Une série d'études détaillées de terrasses marines, dans des régions à forts taux de surrection tectonique, et qui s'appuyèrent sur des datations nombreuses, a permis d'élaborer un modèle selon lequel le niveau

marin aurait connu trois fluctuations positives au cours du dernier interglaciaire : environ +6 m vers 125-120 ka (ka : milliers d'années avant l'Actuel), entre -12 et +2 m vers 105-103 ka, et entre -14 et 0 m vers 85-82 ka (BROECKER *et al.*, 1968; BROECKER et VAN DONK, 1970; STEINEN *et al.*, 1973; BLOOM *et al.*, 1974; STEARNS, 1976; etc.). Après 80 ka, c'est-à-dire au début de la dernière période glaciaire, le niveau marin serait descendu à plus de 100 m au-dessous du zéro actuel; lors de deux interstades, vers 60 ka et 30 ka, le niveau marin serait remonté légèrement sans dépasser toutefois une cote de -40 (ou -10?) m sous le niveau actuel. Les eaux océaniques n'ont atteint leur position actuelle qu'à la fin de la première moitié de l'Holocène, vers 6 ka.

Les lignes de rivage du dernier interglaciaire à San Diego (Californie)

A la frontière nord-occidentale de Basse-Californie, dans la région de San Diego, deux terrasses marines ont été datées et ont ainsi pu être attribuées à deux hauts niveaux de la mer du dernier interglaciaire. La terrasse Nestor (ELLIS et LEE, 1919) a été datée radiométriquement ($^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$ et $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$) de 120 ka (KU et KERN, 1974) et un âge d'environ 80 ka a été déterminé par la méthode des taux de racémisation d'acides aminés pour la terrasse Bird Rock (WEHMILLER *et al.*, 1977; KERN, 1977; KARROW et BADA, 1980). Selon KERN (1977), le niveau marin de 105 ka n'aurait laissé que de très rares témoins dans la région de San Diego. Les altitudes moyennes des deux terrasses sont de +25 m pour la terrasse Nestor, et de +10 m pour la terrasse Bird Rock. Compte tenu des altitudes atteintes par les lignes de rivage de ces deux terrasses, il a été estimé que dans la région de San Diego, les taux de surrection ont varié de 190 à 340 mm/ka au cours des derniers 120 000 ans (KERN, 1977). Outre ce soulèvement régional, il arrive que par le jeu de failles actives récentes, comme celle de Rose Canyon, ces terrasses subissent des déplacements verticaux supplémentaires et des basculements (KERN, 1977).

Données géochronologiques dans la région de l'étude

Datations radiométriques

En territoire mexicain, dans la région étudiée, deux séries de datations radiométriques de fossiles du dernier interglaciaire sont disponibles, la première sur la côte sud-occidentale de Basse-Californie, et la seconde sur la rive orientale du golfe de Californie (fig. 2). Des coraux et échinodermes de la basse terrasse (+6 m) de l'île Magdalena ont fourni 9 résultats radiométriques ($^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$ et $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$)

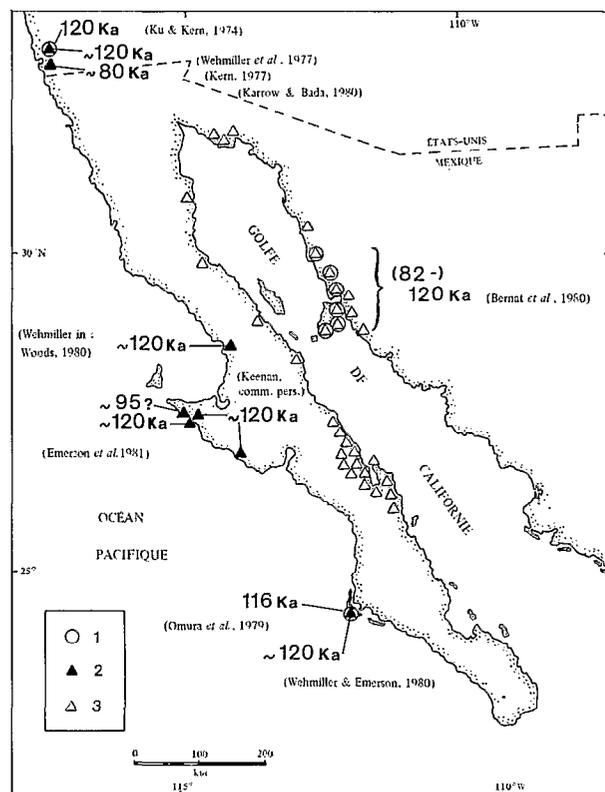


FIG. 2. — Données géochronologiques concernant les dépôts marins du dernier interglaciaire, dans la région du golfe de Californie. 1 : datations radiométriques (U/Th et Pa/U); 2 : résultat de datation relative par la méthode des acides aminés; 3 : tentative de datation par la méthode des acides aminés (en cours).

dont la moyenne est de 116 ka (OMURA *et al.*, 1979). La seconde série, obtenue sur des mollusques (*Dosinia ponderosa*) de la terrasse la mieux représentée de la côte de Sonora et de l'île Tiburon, consiste en un ensemble de résultats radiométriques ($^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$) compris entre 82 et 120 ka, avec une moyenne de 93 ka (BERNAT *et al.*, 1980); on ne tiendra pas compte, ici, des trois âges nettement plus jeunes, et d'un quatrième beaucoup plus vieux, qui ont été obtenus également sur des dépôts de la côte orientale du golfe (BERNAT *et al.*, 1980; ORTLIEB, 1981 b).

Les datations de l'île Magdalena permettent de confirmer que les dépôts étudiés appartiennent effectivement au maximum de la transgression du dernier interglaciaire; celles de la côte orientale du golfe de Californie par contre semblent indiquer que les trois hauts niveaux marins susmentionnés (125-120, 105-103 et 85-83 ka) seraient représentés. En fait, cette interprétation selon laquelle il y aurait des témoins de trois hauts niveaux marins du dernier inter-

glaciaire sur les côtes de Sonora et de l'île Tiburon est difficilement concevable. En effet, tous les échantillons analysés proviennent d'affleurements, certes discontinus mais qui sont tous attribuables, sur le terrain, à un seul et même haut niveau marin, et qui, de plus, sont à des altitudes tout à fait comparables (à un ou deux mètres près). D'ailleurs, dans l'une des localités, cinq coquilles de *Dosinia ponderosa*, d'un même horizon stratigraphique, ont fourni des âges variant entre 82 et 120 ka (une sixième coquille a même été datée de 64 ka) (BERNAT *et al.*, 1980). Il apparaît ainsi que des échantillons du même dépôt fournissent des résultats radiométriques exagérément différents les uns des autres. Les échantillons analysés sont des mollusques, et l'on sait que, pour certains auteurs, même en l'absence d'indices de recristallisations ou de contaminations, ils ne donnent pas de résultats radiométriques aussi fiables que les coraux (KAUFMAN *et al.*, 1971). En conséquence, on considérera que la dispersion des résultats obtenus sur la côte orientale du golfe est essentiellement liée aux difficultés d'utilisation de la méthode $^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$ dans le cas des mollusques et/ou à des conditions géochimiques locales défavorables. On suppose que les affleurements étudiés appartiennent à la même terrasse que celle de l'île de Magdalena et qu'ils sont tous contemporains du maximum marin du dernier interglaciaire (125-120 ka). Une nouvelle série d'une trentaine d'échantillons, provenant de diverses localités des deux côtés de la péninsule de Basse-Californie, et dont on suppose qu'ils sont du dernier interglaciaire, sont actuellement en cours de datations par la méthode $^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$.

Datations par taux de racémisation des acides aminés

La méthode de datation relative par les taux de racémisation d'acides aminés de la matière organique incluse entre les cristaux de carbonate de calcium de coquilles fossiles, a été utilisée avec succès dans les régions arctiques et sur l'ensemble de la côte occidentale des États-Unis (MILLER et HARE, 1975; LAJOIE *et al.*, 1975; MASTERS et BADA, 1977; WEHMILLER *et al.*, 1977; 1978; WEHMILLER et BELKNAP, 1978; KARROW et BADA, 1980). Cette méthode commence à être appliquée à des échantillons du nord-ouest mexicain. Les premiers résultats publiés concernent la côte pacifique de la péninsule.

Dans deux localités, l'île Magdalena et au N.-E. de Bahia Vizcaino, les rapports énantiomériques de divers acides aminés (leucine, valine, proline, acide glutamique, etc.) d'échantillons de *Chione* sp. de la basse terrasse suggèrent, par extrapolation des calibrations chronostratigraphiques faites en Californie, et en tenant compte des variations latitudinales de températures (actuelles), un âge d'environ 120 ka (fig. 2) (WEHMILLER et EMERSON, 1980;

WOODS, 1980). Dans une troisième localité, à proximité de Bahia Tortugas, EMERSON *et al.* (1981) ont analysé les taux de racémisation de coquilles fossiles de deux séries de terrasses, d'altitudes et de contenus faunistiques différents. Ces auteurs ont ainsi cru pouvoir distinguer deux hauts niveaux marins du dernier interglaciaire : l'un serait presque certainement celui de 120 ka, et l'autre serait légèrement plus récent. Compte tenu de l'existence de failles récentes recoupant ces terrasses et provoquant leur basculement, il est difficile d'établir des corrélations latérales entre les vestiges de lignes de rivage anciennes dans les environs immédiats de Bahia Tortugas, et donc de confirmer, par des arguments de terrain, cette hypothèse de deux lignes de rivage du dernier interglaciaire. De toute manière, s'il se vérifie par des datations radiométriques, notamment, que deux phases distinctes de haut niveau marin du dernier interglaciaire ont été enregistrées dans cette zone, cela n'aura pas de signification régionale puisque cette situation est directement liée à la présence de failles locales, bien qu'importantes.

Par ailleurs, une série de résultats d'analyses d'acides aminés sur des échantillons de mollusques (en particulier *Tivela stultorum*) provenant de trois terrasses d'altitudes différentes, dans la région de Bahia Asuncion (péninsule de Vizcaino), permettent de distinguer les dépôts littoraux les plus récents, attribués au dernier interglaciaire, de ceux des deux autres terrasses, lesquelles correspondent probablement aux deux interglaciaires antérieurs (200-220 ka et 300 ka?) (KEENAN et ORTLIEB, en prép.).

Dans le golfe de Californie, enfin, une cinquantaine de localités qui, sur la base d'arguments morphologiques et paléontologiques, semblent pouvoir être attribuées au haut niveau marin du dernier interglaciaire, sont étudiées du point de vue des taux de racémisation (fig. 2). Les résultats préliminaires obtenus montrent que, dans des conditions de températures élevées au Pleistocène supérieur, et du fait du faible enfouissement des fossiles, les acides aminés de ces coquilles ont subi une racémisation extrêmement rapide; de nombreux échantillons sont proches de l'équilibre de racémisation et ne peuvent donc pas se prêter à une interprétation chronostratigraphique (ORTLIEB, en prép.).

Pour conclure ce rapide examen des données géochronologiques actuellement disponibles, on retiendra que, dans plusieurs localités de Basse-Californie et de Sonora, la basse terrasse marine est formellement attribuée au plus haut niveau marin du dernier interglaciaire; dans certains cas cependant, les méthodes de datation employées ne permettent pas de préciser s'il s'agit du plus haut niveau marin de cette période, c'est-à-dire de 125-120 ka, ou d'un niveau marin plus récent (105-103 ka, ou/et 85-

82 ka?). Le fait d'attribuer à une basse terrasse marine un âge de 125-120 ka, alors qu'en réalité elle daterait de moins de 105 ka, se traduirait par une erreur, en baisse, dans l'évaluation du taux de soulèvement de la zone considérée.

PROBLÈMES D'IDENTIFICATION DES DÉPÔTS LITTORAUX DU DERNIER INTERGLACIAIRE

A partir des quelques datations disponibles, et avant l'obtention de résultats géochronologiques supplémentaires, l'interprétation stratigraphique des basses terrasses marines et des dépôts littoraux associés repose en grande partie sur les méthodes classiques de corrélation latérale et verticale. Au cours de l'étude générale des terrasses marines pleistocènes de cette région, il a été possible de distinguer, dans certains cas, celles qui correspondaient aux deux ou trois derniers interglaciaires. L'attribution au dernier interglaciaire de dépôts littoraux est généralement justifiée lorsque les critères suivants sont réunis :

— basse terrasse marine unique, dans laquelle les sédiments proprement marins ne dépassent pas 10 m d'altitude;

— faune fossile bien préservée, sans recristallisation, ou dissolution, notables des coquilles, et cimentation faible des sédiments;

— éventuellement, couverture par des dépôts continentaux (dunes ou alluvions), peu altérés et dont la puissance est compatible avec une période de sédimentation n'excédant pas la centaine de milliers d'années.

Dans les zones où existent plusieurs terrasses marines, emboîtées les unes dans les autres ou non, il apparaît presque toujours, pour des raisons morphostratigraphiques et pétrographiques, que la plus basse terrasse est également la plus récente. Des problèmes stratigraphiques se posent cependant dans les cas où l'on observe deux terrasses, de basse altitude et distinctes, et qui, l'une et l'autre, semblent pouvoir être attribuées à des hauts niveaux marins du dernier interglaciaire. Deux cas particuliers méritent d'être mentionnés. Dans le premier cas, deux affleurements de sédiments marins et littoraux, présentant des caractères sédimentologiques ou paléontologiques distincts, sont observés à des altitudes différant de quelques mètres seulement l'une de l'autre. Même s'il est possible d'établir une chronologie relative, il arrive que les arguments morphostratigraphiques ou/et les degrés d'altération et de consolidation des dépôts ne soient pas suffisants pour évaluer l'intervalle de temps séparant les deux phases de sédimentation (de l'ordre de la dizaine de milliers d'années ou de 100 ka, c'est-à-dire un cycle glaciaire/

interglaciaire complet?). Ce cas se présente dans plusieurs localités de la région de Bahia Concepción (voir cartouche de la fig. 3) et dans le nord-ouest de la péninsule de Basse-Californie. Le second cas est celui où l'on observe, en contrebas d'une terrasse d'abrasion de faible altitude, datant vraisemblablement du maximum marin du dernier interglaciaire, une étroite banquette d'abrasion ou une encoche littorale. On peut alors se demander si la formation de l'encoche ou de la banquette d'abrasion correspond à une courte halte lors de la régression suivant la formation de la terrasse principale, ou s'il s'agit de témoins de l'une des remontées postérieures du niveau marin, de 105-103 ka ou 85-82 ka. Ce cas se rencontre également dans quelques localités de la partie centrale de la côte orientale de Basse-Californie.

Dans toutes les localités où deux lignes de rivage distinctes semblent pouvoir être attribuées au dernier interglaciaire, l'altitude de chacune d'elles a été signalée dans la fig. 3. On observera que, dans divers points de la région de Bahia Concepción, l'écart entre les deux cotes altimétriques relevées est de 6 à 7 m. Cette différence d'altitude est du même ordre que l'écart qui a pu exister entre la position du niveau marin de 125-120 ka et celle de l'un ou l'autre des deux autres hauts niveaux marins du dernier interglaciaire (STEARNS, 1976). Cette situation particulière serait la preuve d'un léger soulèvement régional de la zone de Bahia Concepción.

Dans la majorité des sites étudiés, l'altitude de la ligne de rivage de la terrasse la plus basse est inférieure à +10 m. Dans les quelques cas où celle-ci dépasse +10 m d'altitude, il est souhaitable d'établir à l'aide d'arguments chronostratigraphiques que la ligne de rivage correspond bien au dernier interglaciaire, et non à un interglaciaire antérieur. Dans les trois zones où la paléo-ligne de rivage la plus récente se trouve à une altitude anormalement élevée (fig. 3), il a été possible de suivre de proche en proche son élévation progressive. Dans la zone au nord de Santa Rosalia, sur la côte orientale de Basse-Californie, l'attribution au dernier interglaciaire de la plus basse d'une série de 10 terrasses marines s'appuie notamment sur des considérations d'ordre géométrique : les cotes des lignes de rivage des trois plus basses terrasses sont en progression arithmétique, ce qui suggère que des intervalles de temps semblables ont séparé la formation de chacune des terrasses (y compris la terrasse littorale actuelle) (ORTLIEB, 1981).

Enfin, il faut envisager le cas de certaines localités où la ligne de rivage du dernier interglaciaire est sous le niveau de la mer. Étant entendu que l'absence de vestiges de cette ligne de rivage ne saurait constituer en elle-même la preuve d'un tel enfoncement, il est impératif de réunir d'autres arguments (existence

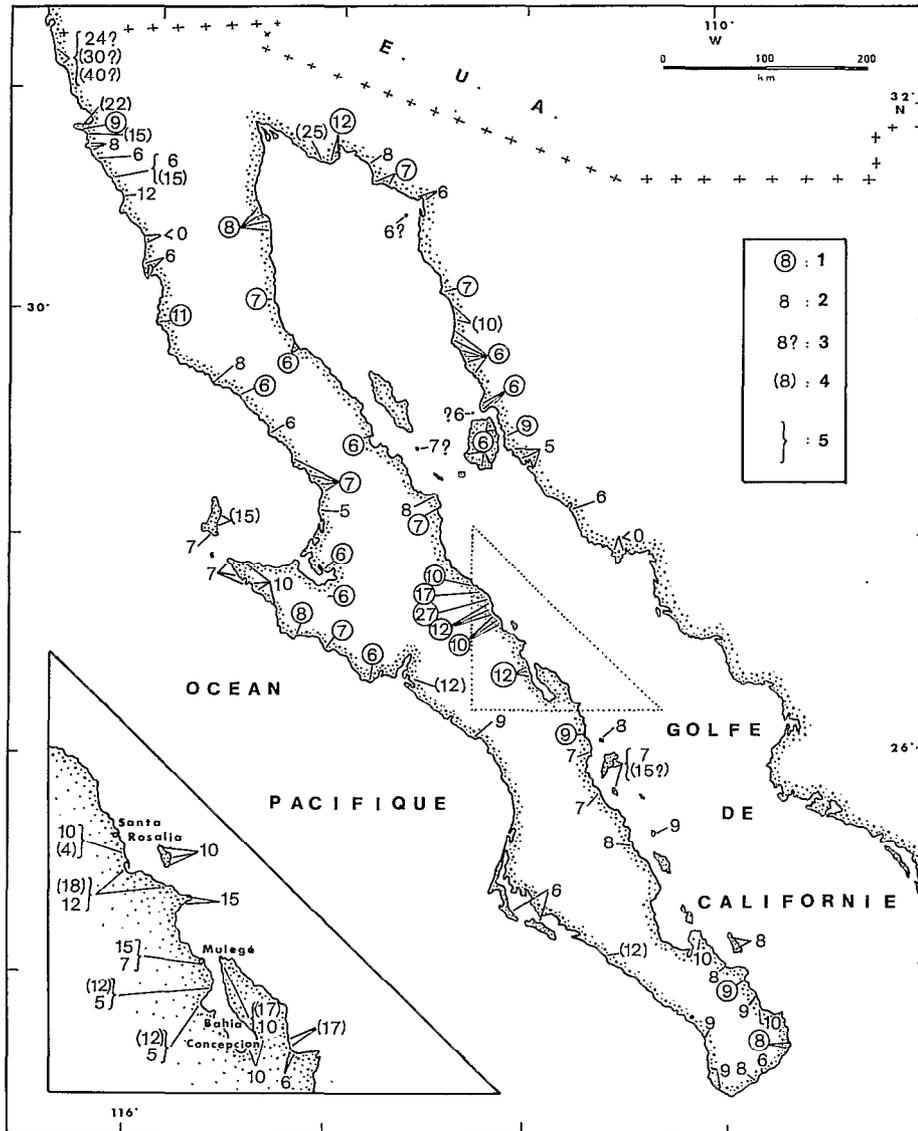


FIG. 3. — Déterminations altimétriques de la position du niveau moyen de la mer lors du maximum de la transgression du dernier interglaciaire (vers 125-120 ka). 1 : position déterminée avec une précision estimée à ± 1 m ; 2 : position déterminée avec une précision estimée à ± 2 m ; 3 : localités pour lesquelles on ne dispose que de données publiées par d'autres auteurs (voir fig. 1) ; 4 : localités dans lesquelles l'attribution au dernier interglaciaire des dépôts marins ou des formes d'érosion littorale est incertaine ; 5 : localités dans lesquelles deux lignes de rivage, basses, pourraient être attribuées à la période du dernier interglaciaire.

de blocs faillés effondrés, ou diminution progressive de l'altitude de la ligne de rivage, par exemple), avant de pouvoir tirer des conclusions néotectoniques. Dans deux régions au moins, il a été établi que la ligne de rivage du dernier interglaciaire se trouvait sous le niveau de la mer actuel : la zone de Guaymas sur la côte de Sonora (ANDERSON, 1950; ORTLIEB et

MALPICA, 1978) et la zone faillée et effondrée de Camalú, au nord de San Quintin, sur la côte nord occidentale de Basse-Californie (ORME, 1972). Bien entendu, le long de certains segments de côte, c'est l'érosion, continentale ou marine (depuis 5 ou 6 ka), qui est responsable de la disparition des témoins du haut niveau marin du dernier interglaciaire.

DÉTERMINATION DE L'ALTITUDE DE L'ANCIEN NIVEAU MOYEN DE LA MER

Mesures altimétriques

La proximité fréquente, de l'ordre de la dizaine de mètres, entre la ligne de rivage actuelle et les terrasses marines du dernier interglaciaire, ainsi que les faibles altitudes de ces dernières, rendent relativement aisées les mesures altimétriques de ces anciennes lignes de rivage. Les mesures sont faites par visées directes, ou à l'aide d'un altimètre anéroïde de précision (Paulin, modèle Microsurveyor, gradué en mètres). La précision de la lecture est d'environ 0,5 m, par temps calme.

Le niveau de référence utilisé est le niveau moyen de la mer actuel. Concrètement, la position de ce niveau est estimée à partir des laisses de marée haute, de la position du niveau de la mer à l'instant de la mesure et des tables de prédiction de marées (Secretaría de Marina et Instituto de Geofísica U.N.A.M.). Compte tenu des variations de marnage, selon les localités et selon les saisons, et du faible nombre de stations marégraphiques, il est souvent nécessaire de procéder à des extrapolations et à des observations sériées pour situer le zéro actuel avec une incertitude inférieure à 0,5 m. Dans l'ensemble de la région, le marnage moyen actuel est compris entre 1 et 3 m. On suppose que lors du dernier interglaciaire, le paléo-marnage devait être comparable au marnage actuel.

Détermination de la position de l'ancien niveau marin

Les dépôts littoraux du dernier interglaciaire sont le plus souvent constitués par une couche d'épaisseur décimétrique à métrique, de blocs, galets et sables fossilifères, reposant sur une surface d'abrasion. Cette surface d'abrasion est relativement plane et légèrement inclinée vers la mer; elle se termine vers l'intérieur des terres par un pied de falaise qui marque la position de l'ancienne ligne de rivage, lors du maximum de la transgression. Sur les côtes rocheuses de la région il n'est pas rare d'observer une plateforme d'abrasion en cours de formation, immédiatement sous le niveau moyen de la mer, en contrebas de la terrasse formée dans des conditions similaires il y a environ 120 ka. Lorsque le substratum rocheux est résistant à l'érosion, et homogène (roches éruptives), on considère que le pied de la falaise ancien marque le niveau des hautes eaux moyennes, alors que si le substratum est tendre (grès ou calcaire), le pied de falaise correspond plutôt à la position des marées les plus hautes et de tempêtes. La cote de l'ancien niveau moyen de la mer se calcule théoriquement en retranchant la moitié de la valeur du marnage (actuel, à défaut de pouvoir déterminer le paléo-marnage) à la cote du niveau des hautes eaux.

Dans la mesure du possible, la position du niveau de la mer étudié est établie à partir de l'ancien pied de falaise, soit que celui-ci soit directement observable sur le terrain, soit qu'il apparaisse en coupe, à la faveur d'une entaille fluviale perpendiculaire à la côte par exemple. Lorsque la terrasse marine est particulièrement large et qu'elle est couverte par des sédiments continentaux, il est généralement difficile de déterminer la position du pied de falaise ancien. Ce cas se présente souvent sur la côte nord-occidentale de la péninsule de Basse-Californie et en Sonora parce que, pour diverses raisons paléoclimatiques et géomorphologiques, l'accumulation de dépôts continentaux y a été plus importante que dans le reste de la région étudiée. A ce propos, on signalera que dans plusieurs localités représentées dans la fig. 3, l'altitude de l'ancien pied de falaise a été réévaluée, à la lumière d'observations nouvelles, ces dernières cotes remplaçant donc certaines valeurs publiées antérieurement (en particulier dans : ANDERSON, 1950; EMERSON et ADDICOTT, 1958; MALPICA *et al.*, 1978; ORTLIEB, 1978 b; 1980; BERNAT *et al.*, 1980).

Les dépôts littoraux du dernier interglaciaire constituent parfois des terrasses marines « construites », qui sont des accumulations de sédiments littoraux, de plusieurs mètres de puissance, et ne présentent pas de formes d'érosion littorale utilisables pour reconstituer la position de l'ancien niveau marin. La détermination de la position maximale atteinte par le niveau moyen de la mer n'est alors possible que si on observe, en coupe stratigraphique, le passage à la fois latéral et vertical entre les sédiments marins et continentaux. Les organismes fossiles, en position de vie, au sommet des dépôts infralittoraux permettent parfois de reconstituer l'épaisseur minimale de la tranche d'eau qui les surmontait. Ainsi les lamellibranches fossiles *Chione* sp., *Dosinia ponderosa* et *Codakia distinguenda*, sont souvent utilisés à cet effet dans les dépôts du golfe de Californie, tandis que *Prolothaca* sp. et *Tivela stultorum*, entre autres, jouent un rôle semblable sur la côte occidentale de la péninsule. Comme dans le cas des anciennes surfaces d'abrasion observées en coupe dans des talus littoraux actuels, le sommet des dépôts marins des terrasses « construites », tels qu'ils affleurent à l'heure actuelle, est presque toujours inférieur, de plusieurs mètres, à l'ancien niveau moyen de la mer.

En résumé, la détermination de la position de l'ancien niveau moyen de la mer peut être faite avec une précision de ± 1 mètre dans les localités où la ligne de rivage, c'est-à-dire le pied de falaise ancien, est clairement repéré. Lorsque la trace de la ligne de rivage n'est pas observée matériellement, le niveau marin moyen du maximum de la transgression du dernier interglaciaire doit être estimé, en prenant en

considération à la fois les caractéristiques morphologiques, sédimentologiques et paléontologiques de la terrasse marine, le contexte géologique et morphostratigraphique de celle-ci et les conditions océanographiques locales (marnage, érosion et sédimentation écologie des faunes). Dans ce dernier cas, la position de l'ancien niveau marin est estimée avec une incertitude qui est souvent de ± 2 m (fig. 3).

DISCUSSION DES RÉSULTATS

L'ensemble des données altimétriques recueillies pour la ligne de rivage (l'ancien niveau moyen de la mer) du dernier interglaciaire sont indiquées dans la fig. 3. Ces données ont été classées en quatre catégories. Dans les localités où l'attribution au dernier interglaciaire de la basse terrasse reste douteuse, l'altitude de la ligne de rivage est mise entre parenthèses. Les trois autres catégories concernent le degré d'incertitude relatif à la détermination de l'altitude de l'ancienne ligne de rivage. Les valeurs entourées d'un cercle représentent des cotes dont la précision est estimée à ± 1 m; les valeurs sans signes distinctifs ont une précision de l'ordre de ± 2 m. Enfin, les nombres suivis d'un point d'interrogation concernent des localités que je n'ai pas visitées personnellement, et pour lesquelles les informations publiées par d'autres auteurs sont peu précises. Dans quelques cas, déjà mentionnés ci-dessus, où il est possible que deux lignes de rivage distinctes correspondent à deux hauts niveaux marins du dernier interglaciaire, les valeurs altimétriques de chacune d'elles ont été indiquées, et regroupées sous une même accolade.

Le premier enseignement que l'on tire de l'ensemble des résultats portés dans la fig. 3 est la relative homogénéité de l'altitude de la ligne de rivage du dernier interglaciaire. Si l'on tient compte de l'imprécision des mesures (± 1 à ± 2 m), cette ligne de rivage, dans la grande majorité des localités, se trouve entre +6 et +9 m. Cela suggère donc qu'une partie importante des côtes de Sonora et de Basse-Californie a été pratiquement exempte de mouvements verticaux lors du Quaternaire supérieur.

Dans trois zones seulement apparaissent des soulèvements dont l'amplitude dépasse la dizaine de mètres. La première zone est située à l'extrémité nord-occidentale de la région de l'étude, la deuxième se trouve au milieu de la côte orientale de Basse-Californie, et la troisième concerne le nord du golfe de Californie. Pour la région située au sud de San Diego, entre Punta Banda et la frontière, les informations sont rares et imprécises : la position des anciens niveaux marins est difficile à déterminer, notamment du fait de l'importance de la sédimentation continentale postérieure et parce que dans cette zone surtout, les datations radiométriques

manquent pour distinguer les éventuelles terrasses de 105-103 ka et 85-82 ka de celle du maximum marin du dernier interglaciaire. Le régime tectonique de cette zone a été semblable à celui, mieux étudié, qui a affecté le sud-ouest de la Californie. Dans cette région, à un soulèvement régional se superpose une tectonique active de blocs faillés, illustrée par les rejeux récents de la faille Agua Blanca par exemple (ALLEN *et al.*, 1960; KRAUSE, 1962; 1965). Puisque au sud de Punta Banda, la ligne de rivage du dernier interglaciaire ne dépasse que très rarement +10 m d'altitude, on peut se demander, d'une part, si la faille d'Agua Blanca ne limiterait pas deux provinces tectoniques distinctes, et d'autre part, si le soulèvement observé de part et d'autre de la frontière, et dont l'amplitude moyenne à San Diego a été de 250 mm/ka depuis le dernier interglaciaire, ne diminue pas d'amplitude, progressivement, vers le sud.

Dans la région de Santa Rosalia, l'altitude maximale à laquelle a été observée la ligne de rivage attribuée au dernier interglaciaire est +28 m (ORTLIEB, 1981 a). Le soulèvement mis ainsi en évidence est localisé sur une partie du flanc d'un massif volcanique plio-pleistocène (SCHMIDT *et al.*, 1977; DEMANT, 1981; ORTLIEB, 1981 a). La ligne de rivage de cette localité, Cabo Virgenes, est située à la base d'une série de terrasses d'abrasion emboîtées, espacées régulièrement, et dont on peut penser qu'elles ont été formées chacune par un haut niveau marin interglaciaire; cette interprétation s'appuie sur une corrélation théorique de chacune des terrasses avec les principaux stades isotopiques de la courbe paléoclimatique de la carotte océanique 128-238 (SHACKLETON et OPDYKE, 1973). Le taux de soulèvement est supposé constant depuis la fin du Pleistocène inférieur, et s'élèverait à environ 250 mm/ka (ORTLIEB, 1981 a). L'origine de ce mouvement vertical est certainement volcanotectonique mais il est difficile de faire la part exacte des causes proprement volcaniques (phénomène de « resurgent doming » ou phase d'intumescence secondaire : DEMANT, 1981; DEMANT et ORTLIEB, 1981), de celles qui relèvent du régime tectonique régional (SCHMIDT, 1975; COLLETTA et ANGELIER, 1981). De part et d'autre de cette localité, la ligne de rivage du dernier interglaciaire s'abaisse jusqu'à une altitude de +10 m, retrouvant ainsi sa position habituelle dans la région.

Enfin, la troisième zone qui apparaît avoir été soulevée au Quaternaire supérieur se trouve à la limite entre le golfe de Californie et le système de failles de San Andreas, plus précisément sur le compartiment nord-oriental de la faille de San Jacinto-Gerro Prieto (COLLETTA et ORTLIEB, 1979; 1981). Malgré l'absence de données radiométriques confirmant que les dépôts littoraux et deltaïques qui y ont été observés jusqu'à +25 m, sont bien du dernier interglaciaire, un taux de soulèvement de l'ordre de

150 mm/ka est envisagé. Ce soulèvement dont il existe d'autres indices, géomorphologiques et tectoniques, s'est effectué sur la rive orientale de l'embouchure du Rio Colorado et n'a affecté, ni la rive occidentale du delta du Colorado, ni la partie orientale de Bahia Adair où la trace du niveau marin du dernier interglaciaire se retrouve à une altitude de +8 m.

Parmi les zones où sont apparues des différences sensibles d'altitude de la ligne de rivage du dernier interglaciaire, on rappellera le cas de Bahia Concepción. Dans cette région, il est délicat d'établir, sur la foi de critères géomorphologiques, pétrographiques et paléontologiques, si deux lignes de rivage appartiennent à deux hauts niveaux marins du dernier interglaciaire, ou si la plus élevée d'entre elles doit être attribuée à l'interglaciaire précédent (vers 200 ka). Il est donc prématuré d'essayer d'interpréter les déformations éventuellement subies dans cette région, au cours du Quaternaire supérieur, avant de disposer d'une meilleure chronostratigraphie (datations en cours).

Autour de l'extrémité méridionale de la péninsule de Basse-Californie des restes de la ligne de rivage du dernier interglaciaire sont observés à des altitudes de +6 à +10 m. L'imprécision, de ± 2 m, de la plupart des cotes altimétriques déterminées dans cette zone peut suffire à expliquer cet écart maximal de 4 m. En fait, s'il y eut des déformations verticales récentes à la pointe de la péninsule, il semble que celles-ci n'aient été que de très faible amplitude.

Sur la côte de Sonora, et dans les îles de la moitié septentrionale du golfe, la trace de l'ancien niveau marin étudié s'observe à des altitudes d'environ +6 m. En une localité de la côte de Sonora central, la ligne de rivage apparaît à +9 m, ce qui a été interprété comme la conséquence d'un rejeu de faille (ORTLIEB et MALPICA, 1978). Dans la région de Guaymas, ainsi que sur la côte méridionale de Sonora, aucun dépôt marin pleistocène n'a été observé, ou signalé dans la littérature.

CONCLUSION

Hormis trois zones d'extension limitée, la ligne de rivage du dernier interglaciaire est préservée, sur l'ensemble des côtes de Basse-Californie et de la moitié septentrionale de Sonora, à une altitude de +6 à +9 m par rapport au niveau moyen de la mer actuel. Cette ligne de rivage est supposée être contemporaine du plus haut niveau marin qui ait été atteint lors de la dernière période interglaciaire, soit vers 125-120 ka. L'altitude actuelle des traces de l'ancien niveau marin, dans cette région, est très voisine de l'estimation qui peut être faite de la position eustatique de ce niveau de 125-120 ka; cela implique donc que, dans l'ensemble, la région a été remarquablement exempte de mouvements verticaux récents de grande envergure.

Pour être plus fermement établie, cette stabilité régionale déduite de la position de la ligne de rivage du dernier interglaciaire devra s'appuyer sur un plus grand nombre de datations concordantes, bien que l'extrême rareté de récifs coralliens d'une part, et les conditions paléoclimatiques défavorables d'autre part, limitent sévèrement l'emploi des méthodes géochronologiques basées sur les décroissances de l'Uranium ou sur les taux de racémisation des acides aminés. Dans certaines localités, légèrement soulevées récemment, il serait éminemment souhaitable de pouvoir identifier les différents hauts niveaux atteints par la mer lors de la période comprise entre 125 ka et 80 ka.

REMERCIEMENTS

Ces travaux de recherche ont été réalisés dans le cadre du Programme Géocortez de l'O.R.S.T.O.M. et de l'Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. L'auteur a largement bénéficié des installations de la Estación Regional del Noroeste du-dit Instituto de Geología, à Hermosillo, Sonora. Il tient à remercier les chercheurs qui l'ont aidé, en particulier sur le terrain : V. MALPICA ; B. COLLETTA ; A. CASTRO.

*Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'O.R.S.T.O.M.
le 2 novembre 1982*

BIBLIOGRAPHIE

- ADDICOTT (W. O.), ERMERSON (W. K.), 1959. — Late Pleistocene invertebrates from Punta Cabras, Baja California, Mexico. *Amer. Museum Novitates*, n° 1925, 33 p.
- ALLEN (C. R.), SILVER (L. T.), STEHLI (F. G.), 1960. — Agua Blanca fault : a major transverse structure of northern Baja California, Mexico. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 71 : 457-482.
- ANDERSON (C. A.), 1950. — E. W. Scripps cruise to the Gulf of California. Part I : Geology of the islands and neighboring land areas. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, n° 43 : 1-53.
- BENDER (M. L.), FAIRBANKS (R. G.), TAYLOR (F. W.), MATTHEWS (R. K.), GODDARD (J. G.), BROECKER (W. S.), 1979. — Uranium-series dating of the Pleistocene reef tracts of Barbados, West Indies. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, Part I, vol. 90 : 577-594.
- BERNAT (M.), GAVEN (C.), ORTLIEB (L.), 1980. — Datation de dépôts littoraux du dernier Interglaciaire (Sangamon), sur la côte orientale du Golfe de Californie, Mexique. *Bull. Soc. Geol. Fr.*, (7), t. XXII, n° 2 : 219-224.
- BLOOM (A.), BROECKER (W. S.), CHAPPELL (M. A.), MATTHEWS (R. K.), MESOLELLA (K. J.), 1974. — Quaternary sea level fluctuations on a tectonic coast : new $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ dates from the Huon Peninsula, New Guinea. *Quaternary Res.*, vol. 4 : 185-205.
- BROECKER (W. S.), THURBER (D. L.), GODDARD (J.), MATTHEWS (R. K.), MESOLELLA (K. J.), 1968. — Milankovitch hypothesis supported by precise dating of coral reefs and deep sea sediments. *Science*, vol. 159 : 297-300.
- BROECKER (W. S.), VAN DONK (J.), 1970. — Insolation changes, ice volumes and the 0° record in deep sea cores. *Rev. Geophys. Space Phys.*, vol. 8 : 169-198.
- COLLETTA (B.), ORTLIEB (L.), 1979. — Neotectonic evolution of the northernmost coastal area of the Gulf of California, Mexico. *Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog.*, vol. 11, n° 7 : 403-404.
- COLLETTA (B.), ORTLIEB (L.), 1981. — La actividad tectónica cuaternaria en la extremidad meridional del sistema de San Andrés. Memoria del Simposio sobre asentamientos humanos en la Falla de San Andrés (Tijuana, B.C.N., 1979) : 75-90.
- COLLETTA (B.), ANGELIER (J.), 1981. — Faulting evolution of the Santa Rosalia Basin, Baja California Sur, Mexico. *In : Geology of northwestern Mexico and southern Arizona, fieldguides and papers*, L. Ortlieb et J. Roldan (eds.), Inst. Geol. Univ. Nal. Autón. Mexico, Hermosillo : 265-274.
- DEMANT (A.), 1981. — Plio-quaternary volcanism of the Santa Rosalia area, Baja California, Mexico. *In : Geology of northwestern Mexico and southern Arizona, fieldguides and papers*, L. Ortlieb et J. Roldan (eds.), Inst. Geol. Univ. Auton. Mexico, Hermosillo : 295-307.
- DEMANT (A.), ORTLIEB (L.), 1981. — Plio-pleistocene volcano-tectonic evolution of La Reforma Caldera, Baja California, Mexico. *In : Recent crustal movements 1979* ; P. Vyskocil, R. Green, H. Malzer (eds.), *Developments in Geotectonics*, 16, Elsevier Publ. : 194 (résumé).
- DOWLEN (R. J.), MINCH (J. A.), 1973. — Late Pleistocene invertebrates from Rancho Miramar and Las Cruces, Southern Baja California. *Veliger*, vol. 16, n° 2 : 159-162.
- ELLIS (A. J.), LEE (C.), 1919. — Geology and groundwater of the western part of San Diego County, California. *U.S. Geol. Survey Water Supply Paper* 446.
- EMERSON (W. K.), 1956. — Pleistocene invertebrates from Punta China, Baja California, with remarks on the composition of the Pacific coast Quaternary faunas. *Amer. Mus. Natur. Hist. Bull.*, vol. III, art 4. : 319-342.
- EMERSON (W. K.), ADDICOTT (W. O.), 1958. — Pleistocene invertebrates from Punta Baja, Baja California, Mexico. *Amer. Mus. Novitates*, n° 1909, 11 p.
- EMERSON (W. K.), 1980. — Invertebrate of late Pleistocene age with zoogeographic implications, from Turtle Bay, Baja California Sur, Mexico. *The Nautilus*, vol. 94, n° 2 : 67-89.
- EMERSON (W. K.), 1960. — Pleistocene invertebrates from Cerralvo Island. *In : Results of the Puritan*, Amer. Mus. Natur. History Exped. to western Mexico. *Amer. Mus. Novitates*, n° 1995, 6 p.
- EMERSON (W. K.), HERTLEIN (L. G.), 1964. — Invertebrate megafossils of the Belvedere expedition to the Gulf of California. *San Diego Soc. Natur. Hist. Trans.*, vol. 13 : 333-368.
- EMERSON (W. K.), KENNEDY (G. L.), WEHMILLER (J. F.), KEENAN (E.), 1981. — Age relations and zoogeographic implications of late Pleistocene marine invertebrate faunas from Turtle Bay, Baja California Sur, Mexico. *The Nautilus*, vol. 95, n° 3 : 105-116.
- EMILIANI (C.), 1955. — Pleistocene temperatures. *Jour. Geol.*, vol. 63 : 538-578.
- HAMMOND (E. H.), 1954. — A geomorphic study of the Cape region, Baja California. *Univ. Calif. Publ. Geogr.*, vol. X, n° 2 : 45-112.

- HARMON (R. S.), LAND (L. S.), MITTERER (R. M.), GARRETT (P.), SCHWARZ (H. P.), LARSON (G. L.), 1981. — Bermuda sea level during the last interglacial. *Nature*, vol. 289 : 481-483.
- HERTLEIN (L. G.), EMERSON (W. K.), 1956. — Marine Pleistocene invertebrate from near Puerto Peñasco, Sonora, Mexico. *Trans. San Diego Soc. Natur. Hist.*, vol. 12, n° 8 : 154-176.
- HERTLEIN (L. G.), 1957. — Pliocene and Pleistocene fossils from the southern portion of the Gulf of California. *South. Calif. Acad. Sci. Bull.*, vol. 56 : 57-75.
- JORDAN (E. K.), 1926. — Molluscan fauna of the Pleistocene of San Quintin Bay, Lower California. *Calif. Acad. Sci. Proceed.*, 4th ser., vol. 15, n° 7 : 241-255.
- KARROW (P. F.), BADA (J. L.), 1980. — Amino acid racemization dating of Quaternary raised marine terraces in San Diego County, California. *Geology*, vol. 8 : 200-204.
- KAUFMAN (A.), BROECKER (W. S.), KU (T. L.), THURBER (D. L.), 1971. — The status of U-Series methods of mollusk dating. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, vol. 35 : 1155-1183.
- KERN (J.-P.), 1977. — Origin and history of upper Pleistocene marine terraces, San Diego, California. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 88 : 1553-1566.
- KU (T. L.), KERN (J.-P.), 1974. — Uranium series of the upper Pleistocene Nestor Terrace, San Diego, California. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 85 : 1713-1716.
- KU (T. L.), KIMMEL (M. A.), EASTON (W. E.), O'NEIL (T. J.), 1974. — Eustatic sea level 120 000 years ago on Oahu, Hawaii. *Science*, vol. 183 : 959-962.
- KRAUSE (D. C.), 1962. — Faulting in the continental borderland relative to the Agua Blanca fault. *Geol. Soc. Amer. Spec. Papers*, vol. 68 : 35 (abstr.).
- KRAUSE (D. C.), 1965. — Tectonics, bathymetry and geomagnetism of the southern continental Borderland west of Baja California, Mexico. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 76 : 617-650.
- LAJOIE (K. R.), WEHMILLER (J.-F.), KVENVOLDEN (K. A.), PETERSON (E.), WRIGHT (R. H.), 1975. Correlation of California marine terraces by amino-acid stereochemistry. *Geol. Soc. Amer. Abs. Progr.*, vol. 7, n° 3 : 338-339.
- MALPICA (V.), ORTLIEB (L.), CASTRO del RIO (A.), 1978. — Transgresiones cuaternarias en la costa de Sonora, Mexico. *Rev. Inst. Geol., Univ. Nat. Autón. Mexico*, vol. 2, n° 1 : 90-97.
- MARSHALL (J. F.), THOM (B. G.), 1976. — The sea level in the last interglacial. *Nature*, 263 : 120-121.
- MASTERS (P. M.), BADA (J. L.), 1977. — Racemization of isoleucine in fossil molluscs from Indian middens and interglacial terraces in Southern California. *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 37 : 173-183.
- MESOLELLA (K. J.), MATTHEWS (R. K.), BROECKER (W. S.), THURBER (D. L.), 1969. — The astronomical theory of climatic change : Barbados data. *Jour. Geol.*, vol. 77 : 250-274.
- MILLER (G. H.), HARE (P. E.), 1975. — Use of amino acid reactions in some arctic marine fossils as stratigraphic and geochronological indicators. Carnegie Institution Washington, Yearbook 74 : 612-617.
- OMURA (A.), EMERSON (W. K.), KU (T. L.), 1979. — Uranium series ages of echinoids and corals of the upper Pleistocene Madgalena Terrace, Baja California Sur, Mexico. *The Nautilus*, vol. 94, n° 4 : 184-189.
- ORME (A. R.), 1972. — Quaternary deformation of western Baja California, Mexico, as indicated by marine terraces and associated deposits. 24^e Congr. Geol. Intern., Sect., 3 (Tecton.), n° 24 : 627-634.
- ORTLIEB (L.), 1978a. — Relative vertical movements along the Gulf of California, Mexico, during the late Quaternary. *Geol. Soc. Amer. Abst. Progr.*, vol. 10, n° 7 : 466.
- ORTLIEB (L.), 1978b. — Reconocimiento de las terrazas marinas cuaternarias en la parte central de Baja California. *Univ. Nat. Autón. Mexico, Inst. Geol., Revista*, vol. 2, n° 2 : 200-211.
- ORTLIEB (L.), 1979a. — Quaternary marine terraces in southwestern Vizcaino Peninsula, Baja, California, Mexico. In : Baja California Geology ; Fieldguides and papers, P. L. Abbott et R. C. Gastil (eds.), San Diego State Univ., San Diego Calif. : 89-93.
- ORTLIEB (L.), 1979b. — Terrasses marines dans le nord-ouest mexicain : étude au long d'une transversale entre la côte Pacifique et le Sonora en passant par la péninsule de Basse-Californie. In : *Proceed. 1978 Inter. Sympos. on coastal evolution in the Quaternary* (São Paulo, Brazil) : 453-474.
- ORTLIEB (L.), 1979c. — Quaternary shorelines around Baja California peninsula : neotectonic implications. *Geol. Soc. Amer. Abstr. Progr.*, vol. 11, n° 7 : 490.
- ORTLIEB (L.), 1980. — Neotectonics from marine terraces along the Gulf of California. In : N. A. Mörner (ed.), *Earth rheology : isostasy and eustasy*, *Proceed. of Earth rheology and late Cenozoic isostatic movements, an interdisciplinary Sympos. held in Stockholm* (July 31-Aug. 8, 1977) ; Wiley Interscience Public : 497-504.
- ORTLIEB (L.), 1981a. — Sequences of Pleistocene marine terraces in Santa Rosalia area, Baja, California Sur, Mexico. In : *Geology of northwestern Mexico and southern Arizona, fieldguides and papers*, L. Ortlieb et J. Roldan (eds.), Inst. Geol. Univ. Nat. Autón. México, Hermosillo (Mexico) : 275-293.
- ORTLIEB (L.), 1981b. — Recent investigations on Quaternary geology of the coast of central Sonora, Mexico. In : *Geology of northwestern Mexico and southern Arizona, Fieldguides and papers*, L. Ortlieb et J. Roldan (eds.), Inst. Geol. Univ. Nat. Autón. México, Hermosillo (Mexico) : 137-149.
- ORTLIEB (L.), 1981c. — Pleistocene interglacial high stands of sea level in the Gulf of California. *Geol. Soc. Amer. Abstr. Progr.*, vol. 13, n° 2 : 99.
- ORTLIEB (L.), en prép. — Variations du niveau marin quaternaire et neotectonique dans la région du golfe de Californie. Thèse État, Univ. Aix-Marseille II.

- ORTLIEB (L.), MALPICA CRUZ (V.), 1978. — Reconnaissance des dépôts pleistocènes marins autour du golfe de Californie, Mexique. *Cahiers O.R.S.T.O.M., Sér. Géol.*, vol. X, n° 2 : 177-190.
- SCHMIDT (E. K.), 1975. — Plate tectonics, volcanic petrology and ore formation in the Santa Rosalia area, Baja California, Mexico. Master Science Thesis, Univ. Arizona, Tucson.
- SCHMIDT (E. K.), GUILBERT (J. M.), DAMON (P. E.), 1977. — Structural evolution of the Santa Rosalia area, Baja California, Mexico. *Geol. Soc. Amer. Abstr. Progr.*, vol. 9, n° 7 : 1160-1161.
- SHACKLETON (N. J.), OPDYKE (N. P.), 1973. — Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28-238 : oxygen isotope temperature and ice volumes on a 10⁶ and 10⁹ year time scale. *Quaternary Res.*, vol. 3 : 39-55.
- SHACKLETON (N. J.), OPDYKE (N. D.), 1976. — Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of Pacific Core V28-239 : late Pliocene to latest Pleistocene. *Geol. Soc. Amer. Mem.* 145 : 449-464.
- SQUIRES (D. F.), 1959. — Corals and coral reefs in the Gulf of California. In : Results of the Puritan American Museum of Natural History expedition to western Mexico. *Amer. Mus. Natur., Hist. Bull.*, vol. 118, art. 7 : 367-432.
- STEARNS (C. E.), 1976. Estimates of the position of sea level between 140 000 and 75 000 years ago. *Quaternary Res.*, vol. 6, n° 3 : 445-449.
- STEINEN (R. P.), HARRISON (R. S.), MATTHEWS (R. K.), 1973. — Eustatic low stand of sea level between 125 000 and 105 000 BP : evidence from the subsurface of Barbados, West Indies. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 84 : 63-70.
- VALENTINE (J. W.), ROWLAND (R. W.), 1969. — Pleistocene invertebrates from northwestern Baja California del Norte, Mexico. *Calif. Acad. Sci. Proc.*, vol. 36 : 511-530.
- WALKER (T. R.), THOMPSON (R. W.), 1968. — Late Quaternary geology of the San Felipe area, Baja California, Mexico. *Journ. Geol.*, vol. 76 : 479-485.
- WEHMILLER (J. F.), LAJOIE (K. R.), KYENVOLDEN (K. A.), PETERSON (E.), BELKNAP (G. L.), KENNEDY (G. L.), ADDICOTT (W. D.), VEDDER (J. G.), WRIGHT (R.), 1977. — Correlations and chronology of Pacific coast marine terrace deposits of Continental United States by fossil amino acid stereo-chemistry, technique evaluation, relative ages, kinetic model ages and geologic implications. U.S. Geol. Survey, Open file report, n° 77-680.
- WEHMILLER (J. F.), BELKNAP (D. F.), 1978. — Alternative kinetic models for the interpretation of amino acid enantiomeric ratios in Pleistocene mollusks : examples from California, Washington and Florida. *Quaternary Res.*, vol. 9 : 330-348.
- WEHMILLER (J. F.), LAJOIE (K. R.), SARNA-WOJCICKI (A. M.), YERKES (R. F.), 1978. — Unusually high rates of crustal uplift in Ventura County, California, inferred from Quaternary marine terraces chronology. *Geol. Soc. Amer. Abstr. Progr.*, vol. 10, n° 7 : 513.
- WEHMILLER (J. F.), EMERSON (W. K.), 1980. — Calibration of amino acid racemization in late Pleistocene mollusks : results from Magdalena Bay, Baja California Sur, Mexico, with dating applications and paleoclimatic implications ; *The Nautilus*, vol. 94, n° 1 : 31-36.
- WOODS (A. J.), 1978. — Marine terraces between Playa el Marron and Morro Santo Domingo, Central Baja California, Mexico. Ph. D. Thesis, Univ. California at Los Angeles.
- WOODS (A.), 1980. — Geomorphology, deformation and chronology of marine terraces along the Pacific coast of central Baja California, Mexico. *Quaternary Res.*, vol. 13 : 346-364.