

Mer Rouge
Quaternaire
Biométrie
Modèle
Foraminifère

Red Sea
Quaternary
Biometry
Model
Foraminifera

Intérêt paléocéanographique d'*Orbulina universa* d'Orbigny (foraminifère)

Pierre HAENEL

Laboratoire de Géologie, Facultés Catholiques de Lyon, 25, rue du Plat, 69288 Lyon Cedex 02.

Reçu le 3/4/86, révisé le 16/6/86, accepté le 25/6/86.

RÉSUMÉ

L'étude de la variabilité d'*Orbulina universa* d'Orbigny s'inscrit dans le cadre de la reconstitution paléocéanographique du quaternaire récent du golfe d'Aqaba et du nord de la Mer Rouge. Une analyse biométrique montre que le diamètre d'*Orbulina universa* est la variable dominante, et que les autres variables mesurables lui sont étroitement liées. A l'aide des données actuelles concernant cette espèce, un modèle expliquant la variabilité du diamètre en fonction des principaux facteurs physico-chimiques est élaboré. Ce modèle, appliqué aux échantillons de la partie nord de la Mer Rouge, permet d'interpréter les valeurs des diamètres moyens en fonction de l'écologie et d'apporter une connaissance sur l'évolution du gradient actuel de densité, salinité et température des eaux durant le quaternaire récent.

Oceanol. Acta, 1987, 10, 1, 15-25.

ABSTRACT

Paleoceanographic value of *Orbulina universa* d'Orbigny (foraminifera)

The study of the variability of *Orbulina universa* d'Orbigny forms part of the late Quaternary paleoceanographic reconstitution of the Gulf of Aqaba and Northern Red Sea. Biometrical analysis shows that the diameter of *Orbulina universa* is the most important variable and that the other variables are closely related to it. On the basis of recent data concerning this species, a model explaining the variability of the diameter, in relation to the other main physical-chemical parameters, is worked out. This model, when applied to samples from the northern part of the Red Sea, makes it possible to interpret the values of the average diameters in relation to the ecology, and provides additional information about the evolution of the density, salinity and temperature gradients of the water during the late Quaternary.

Oceanol. Acta, 1987, 10, 1, 15-25.

INTRODUCTION

Généralités

L'étude d'*Orbulina universa* dans le golfe d'Aqaba et le nord de la Mer Rouge s'inscrit dans un travail de reconstitution paléocéanographique de ces régions (Reiss *et al.*, 1974; Reiss *et al.*, 1980; Halicz, Reiss, 1981).

Bien que limitée à une seule espèce, cette étude fournit des informations d'ordre paléocéanographique et donc, indirectement, des informations d'ordre paléoclimatique et paléocéologique, ce qui constitue une grande partie de son intérêt.

La connaissance du quaternaire récent (pléistocène terminal et holocène) du golfe d'Aqaba et du nord de la Mer Rouge a pu être acquise grâce aux forages en mer profonde effectués en avril 1977 par le vaisseau de recherche Atlantis II de la Woods Hole Oceanographic Institution. Ce travail porte sur quatre forages effectués lors de cette expédition et sur un forage plus ancien de l'expédition Vema.

Grâce à l'étude quantitative et qualitative des foraminifères planctoniques et benthiques, des coccolithophoridés et des ptéropodes, grâce aux mesures géochimiques des isotopes stables contenus dans les coquilles d'organismes vivants et fossiles, une stratigraphie très fine a pu être établie dans le quaternaire récent (Reiss *et al.*,

1980; Halicz, Reiss, 1981). Les différents paléoenvironnements ont pu être mis en évidence par comparaison avec l'écologie actuelle : analyses des bio- et thanatocénoses actuelles (composition, caractéristiques morphologiques), corrélations avec les propriétés des masses d'eau et du fond marin. Ces propriétés peuvent être considérées comme les facteurs écologiques majeurs. La composition qualitative des assemblages de foraminifères fossiles est comparable à celle des sédiments récents du golfe d'Aqaba (Reiss *et al.*, 1974). Les différents organismes sont bien préservés; en particulier la préservation des ptéropodes indique l'absence de dissolution des carbonates durant le quaternaire récent en Mer Rouge et dans le golfe d'Aqaba.

L'analyse de la variabilité morphologique d'*Orbulina universa* en relation avec la connaissance actuelle de cette espèce vont permettre de compléter l'interprétation paléoocéanographique du quaternaire récent du nord de la Mer Rouge s.l.

Nous disposons des données suivantes :

- les subdivisions stratigraphiques du quaternaire récent de la région considérée;
- les distributions quantitatives de tous les foraminifères planctoniques des forages PC 71, PC 74, PC 68 et V 14-122;
- des connaissances actuelles quant à la distribution d'*Orbulina universa* dans l'Atlantique Nord et l'Océan Indien.

Tableau 1

Localisation des forages :

PC : forages du projet WHOI (golfe d'Aqaba et nord de la Mer Rouge);

V : forage du projet Vema (Mer Rouge).

Location of cores:

PC: WHOI project cores (Gulf of Aqaba and Northern Red Sea);

V: Vema project core (Red Sea).

Numéro du forage	Latitude Nord	Longitude Est	Profondeur de la mer
PC 72	29°11'5"	34°47'6"	550 m
PC 71	28°50'1"	34°42'4"	735 m
PC 74	28°18'2"	34°31'4"	884 m
PC 68	27°34'4"	34°28'1"	1087 m
V14-122	23°55'	36°28'	1490 m

Contexte stratigraphique

Lithologie et taux de sédimentation

— Lithologie : elle n'a pas été retenue pour établir la zonation du quaternaire récent du nord de la Mer Rouge s.l. En effet la nature lithologique est essentiellement une boue calcaire, parfois lithifiée; la couleur de ces boues est variable : vert olive, grise, blanchâtre, brun-jaune. Certains niveaux de ces boues présentent une fraction silteuse.

— Taux d'accumulation : il est de l'ordre de 3 à 10 cm pour 1000 ans. Le nord de la Mer Rouge présente un taux d'accumulation comparable à celui du golfe d'Aqaba. Apparemment ces taux seraient au moins deux fois plus importants durant l'holocène qu'au pléistocène tardif (Reiss *et al.*, 1980; Taviani, 1984), et cela serait dû aux conditions climatiques entraînant un changement dans le transport des sédiments terrigènes.

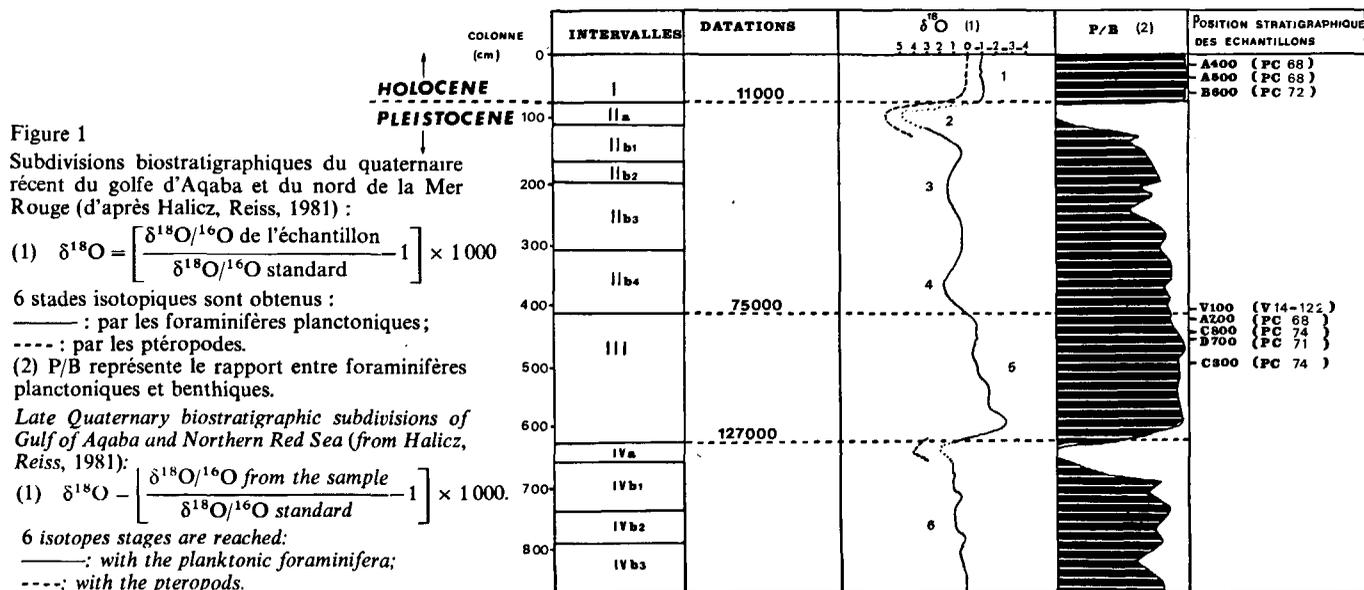
Subdivisions stratigraphiques du quaternaire récent

La stratigraphie du quaternaire récent de la Mer Rouge a fait l'objet de nombreux travaux (Herman, 1968; Berggren, Boersma, 1969). Actuellement de bonnes corrélations existent entre les subdivisions du golfe d'Aqaba et celles de la Mer Rouge. Ces subdivisions ont été obtenues par :

- les datations radiométriques C14,
- les variations du rapport des isotopes de l'oxygène,
- l'étude qualitative et quantitative des foraminifères planctoniques et benthiques (Halicz, Reiss, 1981).

Les foraminifères planctoniques avaient permis une subdivision en 5 intervalles (Reiss *et al.*, 1980), mais l'utilisation simultanée des foraminifères benthiques a permis de définir 11 intervalles (Halicz, Reiss, 1981; fig. 1).

La figure 1 est réalisée d'après Halicz et Reiss (1981) : elle est basée sur le forage PC 74 pour les intervalles I à Iib4 et sur le forage PC 68 pour les intervalles III à IVb3 (tab. 1).



Elle suscite de notre part les commentaires suivants :

— Intervalle I : il représente l'holocène et est corrélé avec le stade isotopique 1. Le rapport P/B est élevé et les faunes correspondent à l'actuel.

— Intervalles IIa et IVa : ce sont les deux derniers maximums glaciaires : ils sont caractérisés par l'absence de foraminifères planctoniques due à de très fortes salinités (> 50, Reiss *et al.*, 1980; Por, 1978). Ils correspondent respectivement aux stades isotopiques 2 et début de 6. Les assemblages de foraminifères benthiques y sont similaires, dominés par des miliolidés. La présence de ptéropodes indique l'absence de dissolution même durant les maximums glaciaires.

— Intervalles IIb1 à IIb4 : il s'agit d'une période glaciaire. Les stades isotopiques correspondants sont 2 (partie inférieure), 3 et 4. Le rapport P/B est élevé, mais inférieur à celui des stades isotopiques 1 et 5.

— Intervalle III : il correspond au stade interglaciaire (stade isotopique 5). Les assemblages de foraminifères sont les mêmes que ceux de l'intervalle I.

— Intervalles IVb1 à IVb3 : ils sont comparables aux intervalles IIb1 à IIb3 respectivement et correspondent au stade isotopique 6.

Les temps glaciaires du quaternaire récent montrent une évolution cyclique stade glaciaire — maximum glaciaire — stade interglaciaire. Les échantillons d'*Orbulina* ont été choisis dans les intervalles I et III afin d'essayer de mettre en évidence des variations morphologiques entre l'actuel et le passé dans un contexte climatique similaire et de les expliquer. Compte tenu de la position des forages, on pourra avoir une vision dans l'espace et dans le temps de ces variations.

Remarques

- Les assemblages de foraminifères du golfe d'Aqaba et du nord de la Mer Rouge diffèrent de ceux de la partie sud de la Mer Rouge et du golfe d'Aden. Cette différence a été attribuée au gradient Nord-Sud du contenu nutritif et à la pénétration de la lumière (Reiss *et al.*, 1974; Reiss *et al.*, 1980).

- Les séquences du golfe d'Aqaba sont comparables à celles de la Mer Rouge; les deux eaux furent continuellement réunies à travers le détroit de Tiran. La seule différence dans les séquences se situe durant le dernier maximum glaciaire où il y a absence de coccolithophoridés en Mer Rouge et présence dans le golfe d'Aqaba (Reiss *et al.*, 1980) : les conditions physico-chimiques du golfe furent peut-être moins extrêmes que celles de la Mer Rouge. En effet, d'après plusieurs auteurs (Gvirtzman, Buchbinder, 1977; Gvirtzman *et al.*, 1977; Goldberg, 1977), un climat plus humide qu'actuellement affecterait la péninsule du Sinaï pendant le dernier maximum glaciaire.

- Les données isotopiques sont similaires entre le golfe d'Aqaba et la Mer Rouge. Le signal isotopique global est amplifié en Mer Rouge en période de bas niveau de la mer et de réduction des échanges d'eau avec l'Océan Indien par le détroit de Bab el Mandeb (134 m de profondeur actuellement). Les réductions des échan-

ges d'eau expliquent les fortes valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ aux stades 2, 6 et certainement les valeurs relativement fortes du stade 5 (Reiss *et al.*, 1980); Deuser *et al.* (1976) avaient interprété ces valeurs par des variations du rapport évaporation/précipitation durant les temps glaciaires.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Localisation des forages

Huit échantillons d'*Orbulina universa* ont été prélevés dans cinq carottes (tab. 1 et 2, fig. 2). La répartition stratigraphique des échantillons est indiquée sur la figure 1.

Tableau 2

Numéro des échantillons prélevés dans chaque carotte.
Number of samples from each core.

Numéro du forage	Numéro des échantillons
PC 72	B600
PC 71	D700
PC 74	C300-C800
PC 68	A200-A400-A500
V14-122	V100

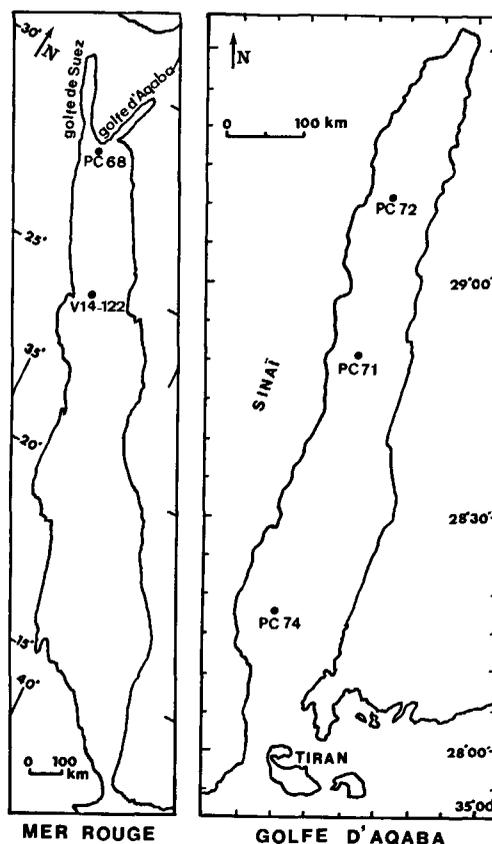


Figure 2

Cartes de localisation des forages Atlantis II (PC) et Vema (V) (d'après Hall, 1976, et Hall, Ben-Avraham, 1978).

Location maps of Atlantis II (PC) and Vema (V) cores (from Hall, 1976, and Hall, Ben-Avraham, 1978).

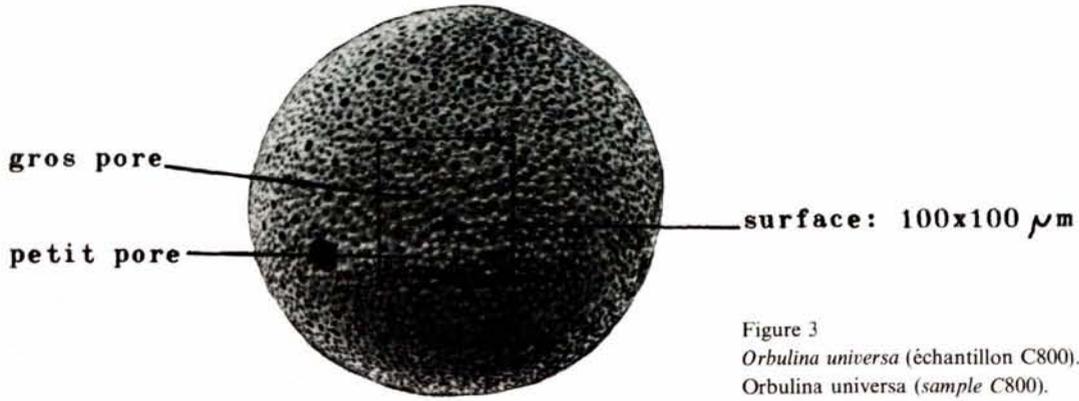


Figure 3
Orbulina universa (échantillon C800).
Orbulina universa (sample C800).

Analyse biométrique d'*Orbulina universa*

But de l'analyse biométrique

Il s'agit d'étudier la variabilité d'un maximum de paramètres choisis sur le test d'*Orbulina universa* afin de mettre éventuellement en évidence :

- un lien existant entre les paramètres,
- la dominance d'un paramètre par rapport à un autre,
- la discrimination des différents échantillons d'orbulines.

Cette analyse est réalisée sur les huit échantillons d'orbulines correspondant à 272 individus au total.

Méthodes et résultats des mesures

Le test d'*Orbulina universa* possède trois caractères présentant une certaine variabilité :

- le diamètre du test,
- le nombre et le diamètre des gros pores,
- le nombre et le diamètre des petits pores (fig. 3).

A partir de ces deux derniers, on déduit la densité de pores et la porosité du test.

— La mesure du diamètre est réalisée sous un microscope binoculaire (grossissement : × 120) à l'aide d'un micromètre oculaire.

— Les mesures et comptages des pores sont effectués sur la surface externe du test à partir des photographies obtenues au microscope électronique à balayage.

— La densité de pores ou concentration est basée sur le nombre total de pores par unité de 100 × 100 µm. Cette surface, choisie arbitrairement, est inférieure à 1% de la surface totale d'une sphère d'orbuline de diamètre 600 µm, ce qui limite les erreurs de parallaxe lors des mesures.

— La porosité se déduit de la densité et du diamètre des pores : Porosité du test (en pourcentage) :

$$PT = \frac{\text{aire totale des pores}}{100 \times 100 \mu\text{m}} \times 100.$$

Abréviations utilisées

- DOR : diamètre des orbulines
- NPP : nombre (densité) de petits pores (DT : densité totale)
- NGP : nombre (densité) de gros pores (DT : densité totale)
- DPP : diamètre des petits pores
- DGP : diamètre des gros pores
- PPP : porosité des petits pores (PT : porosité totale)
- PGP : porosité des gros pores (PT : porosité totale).

Les résultats moyens des mesures pour les huit échantillons sont présentés dans le tableau 3.

Exploitation des mesures

Corrélations entre les paramètres

La réalisation de la matrice des corrélations permet de chiffrer la relation existante entre deux paramètres. Son analyse donne les résultats suivants :

Tableau 3
 Tableau des moyennes des mesures des huit échantillons d'*Orbulina universa* du golfe d'Aqaba et de la Mer Rouge.
 Table of averages of the measures of eight *Orbulina universa* samples from the Gulf of Aqaba and the Red Sea.

Échantillons (nombre d'individus mesurés)	Paramètres								
	DOR	NPP	NGP	DT	DPP	DGP	PPP	PGP	PT
A200 (36)	458,90	30,68	4,06	34,75	4,87	13,53	6,30	5,46	11,77
A400 (24)	502,00	37,15	5,72	42,88	7,24	14,80	13,19	10,68	23,88
A500 (36)	515,50	45,75	4,50	50,26	4,50	14,26	8,22	7,37	16,20
B600 (23)	390,80	52,08	4,82	56,91	5,48	12,52	13,26	5,63	18,89
C300 (36)	484,30	49,47	6,13	55,61	4,51	12,16	9,06	7,16	16,22
C800 (44)	453,10	37,02	3,83	40,86	6,48	13,81	13,59	6,38	19,97
D700 (43)	434,70	39,32	4,57	43,89	4,92	13,73	6,48	7,23	13,71
V100 (30)	583,90	53,38	4,99	58,37	4,37	13,09	9,32	7,50	16,84
Moyennes	477,90	43,10	4,83	47,94	5,30	13,49	10,00	7,18	17,19
Variances	2962,52	82,73	0,53	64,95	0,96	0,66	7,80	2,30	12,35

Les diamètres sont exprimés en microns, les porosités en pourcentages.

— le diamètre des orbulines présente essentiellement une corrélation positive avec le nombre et le diamètre des gros pores;

— l'augmentation du nombre de pores implique une diminution de leur diamètre;

— la porosité est liée positivement avec le diamètre des pores plutôt qu'avec leur densité.

Classification des paramètres par ordre d'influence

Une analyse factorielle des correspondances a été réalisée avec le programme ANAFAC COR de la bibliothèque programmatique ADDAD (Benzecri *et al.*, 1980).

Elle classe les paramètres en fonction de leur influence dans la variabilité de l'espèce et leur action différentielle au niveau des échantillons (fig. 4).

L'ordre d'influence des paramètres dans la variabilité est par ordre croissant: DPP, PPP, PGP, DGP, NGP, NPP, DOR.

Il en résulte que c'est le diamètre d'*Orbulina universa* qui est la variable dominante, les corrélations entre les variables se retrouvent et permettent une différenciation approximative des échantillons.

Discrimination des échantillons

Une classification hiérarchique a été réalisée avec le programme CAH 2 de la bibliothèque programmatique ADDAD (Benzecri *et al.*, 1980). Cette analyse multivariée affine la discrimination des échantillons, ce qui est représenté par la figure 5.

Les échantillons peuvent donc être séparés en quatre groupes :

Groupe 1 : A200-D700-C300, les valeurs des variables sont peu élevées;

Groupe 2 : A400-C800, fortes valeurs de DPP et PPP, faibles valeurs de DOR et NPP;

Groupe 3 : A500-V100, fortes valeurs de NPP et DOR, faibles valeurs de DPP et PPP;

Groupe 4 : B600, se différencie du groupe 2 par sa forte valeur de NPP qui est la deuxième variable dominante.

Cet échantillon pose un problème car NPP possède normalement une corrélation positive avec DOR et négative avec PPP et DPP.

En conclusion :

Les échantillons sont essentiellement groupés en fonction de la valeur de la variable dominante, le diamètre moyen des tests d'orbulines. Ce dernier reflète la croissance terminale étant donné que les individus sont des formes adultes; il peut être également l'expression de la vitesse de croissance. Au sein d'un échantillon, le diamètre serait l'expression la plus importante de la variabilité d'*Orbulina universa*, et de ce fait il influencerait les autres paramètres. Il est possible que cette variabilité puisse être liée à la différence de profondeur de vie des organismes, malheureusement nous ne possédons pas de données assez précises à ce sujet. On sait que la plupart des foraminifères planctoniques vivent à des profondeurs différentes durant leur ontogénie (Emiliani, 1954). *Orbulina universa* montre parfois un

	B 600	C 800	A 400	D 700	A 200	C 300	A 500	V 100
DPP	hatched	hatched	hatched					
PPP	hatched	hatched	hatched					
PGP			hatched	hatched			hatched	hatched
DGP		hatched	hatched	hatched	hatched		hatched	
NGP			hatched			hatched		hatched
NPP	hatched					hatched	hatched	hatched
DOR			hatched			hatched	hatched	hatched

Figure 4

Classification des échantillons d'*Orbulina universa* en fonction des valeurs des paramètres :

Hachuré simple : valeurs dépassant la moyenne de moins de 10%;

Hachuré croisé : valeurs dépassant la moyenne de plus de 10%.

Classification of the *Orbulina universa* samples according to parameter values:

Simple hatching: values of less than 10% above average;

Cross hatching: values of more than 10% above average.

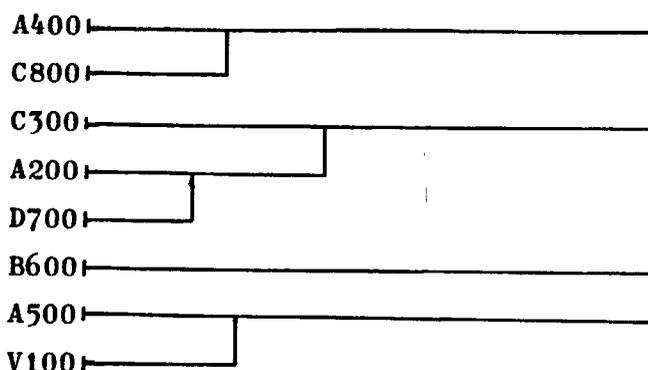


Figure 5

Représentation de la classification hiérarchique des 8 échantillons en fonction des 7 paramètres considérés.

Representation of the scalogram analysis of the 8 samples based on the 7 parameters.

épaississement de la paroi de la dernière loge sphérique sous la forme d'un encroutement calcitique (Be *et al.*, 1973) qui soulignerait une migration en eau profonde (Hemleben, Spindler, 1983). De ce fait, les caractéristiques morphologiques de la dernière loge seraient fixées dès sa formation et, apparemment, la seule modification morphologique liée au changement de profondeur se marquerait par l'épaississement de la paroi du test sphérique. Les loges trochospirales, contenues à l'intérieur de la loge sphérique, sont résorbées progressivement avec la profondeur de vie des organismes et, à 300 m de fond, le test sphérique est vide; cela est attribué à la formation des gamètes (Le Calvez, 1936).

Orbulina universa dans l'actuel : construction d'un modèle interprétatif de sa variabilité en fonction de l'écologie

Les données

Des études concernant la répartition et la composition qualitative des foraminifères planctoniques dans l'Atlantique Nord et l'Océan Indien ont été réalisées par Be et Hamlin (1967), Be et Tolderlund (1971), Be

et al. (1973), Be et Duplessy (1976), Hecht *et al.* (1976), Be et Hutson (1977).

A partir de leurs observations, il apparaît que :

— *Orbulina universa* est une espèce peu abondante parmi les foraminifères planctoniques; elle dépasse rarement 5% de la faune;

— elle possède une large répartition géographique : 45°S à 45°N environ (provinces tropicale, subtropicale et transitionnelle);

— elle présente une abondance relative sur les bordures sud des masses d'eau centrales (provinces subtropicales) qui sont caractéristiques par leur salinité élevée et leur faible taux nutritif; la concentration en foraminifères planctoniques y est faible. *Orbulina universa* apparaît comme étant une espèce opportuniste, capable de s'adapter à des milieux oligotrophes de forte salinité.

Sur la surface du sédiment de l'Océan Indien, les tests d'*Orbulina universa* ne dépassent jamais 5% des foraminifères planctoniques, et il n'y a aucune variation quantitative notable dans leur distribution, ce qui peut être lié à la dissolution, aux courants de fond, aux variations saisonnières ou autres variations à long terme affectant les populations d'orbules. Malgré l'absence de variations quantitatives, la distribution relative globale par rapport au total des foraminifères planctoniques est respectée sur la surface du sédiment.

En ce qui concerne la variable dominante, le diamètre d'*Orbulina universa*, Be *et al.* (1973) montrent qu'il existe une bonne corrélation négative entre la latitude et le diamètre moyen des tests et une bonne corrélation positive entre le diamètre et la température. Une corrélation négative avec la salinité n'a pas été retenue car elle ne s'appliquerait que dans les régions équatoriales. Une corrélation négative avec la densité est associée à la corrélation latitudinale.

Sur la surface du sédiment, ces corrélations se retrouvent et les assemblages d'orbules possèdent des variations de diamètre plus régulières, reflétant le mélange des faunes sur le fond de l'océan. Les diamètres des tests des individus vivants sont généralement plus larges que ceux des tests de la surface du sédiment. Plusieurs explications peuvent être invoquées :

— une fréquence élevée de la mortalité chez les petites formes;

— les variations saisonnières affectant les populations d'orbules et leur diamètre;

— la dissolution sélective : les petits tests sont plus épais que les grands et résistent mieux à la dissolution.

Exploitation de ces données

Les facteurs influençant la présence, l'abondance et éventuellement la morphologie d'une espèce sont très nombreux et la connaissance des interactions entre ces facteurs est très réduite. La fertilité d'un océan, qui est un facteur essentiel, ne semble pas affecter l'abondance et le diamètre des tests d'*Orbulina universa*. En effet, dans la masse d'eau centrale de l'Océan Indien (fig. 6) qui est oligotrophe, le diamètre moyen des orbules décroît normalement du Nord vers le Sud en fonction de la latitude.

Par contre, il existe un lien étroit entre le diamètre et les trois principaux facteurs physico-chimiques mesurables : la température, la salinité et la densité des eaux de surface; que l'on peut considérer comme les facteurs écologiques majeurs. Étant donné que la corrélation négative entre le diamètre et la salinité n'est pas toujours respectée, il était possible de penser que ces trois facteurs n'ont pas une influence égale sur le diamètre des orbules.

Avec les données fournies par Be *et al.* (1973) et Wyrki *et al.* (1971) (tab. 4), nous avons réalisé une étude de la régression multiple qui permet de classer ces trois facteurs en fonction de leur influence sur le diamètre moyen d'*Orbulina universa*. En utilisant les températures, salinités et densités des eaux de surface de l'Océan Indien durant l'été, et les diamètres moyens des tests de la surface du sédiment, nous avons obtenu d'excellentes corrélations, meilleures qu'avec les diamètres des orbules vivantes.

Ceci peut être expliqué par une certaine inertie d'une adaptation morphologique saisonnière, alors que le diamètre moyen des orbules mortes représente une moyenne au cours d'une ou plusieurs années.

Résultats de l'analyse de la régression multiple :

a) il existe un ordre d'influence des facteurs physico-chimiques sur les diamètres moyens qui est :

densité — salinité — température;

b) la relation linéaire entre le diamètre et ces facteurs peut être chiffrée :

$$\text{DOR} = 1486,6798 - (67,3550 \times d) + (20,0720 \times S)$$

où DOR = diamètre moyen des tests (μm)

d = densité (g/l)

S = salinité.

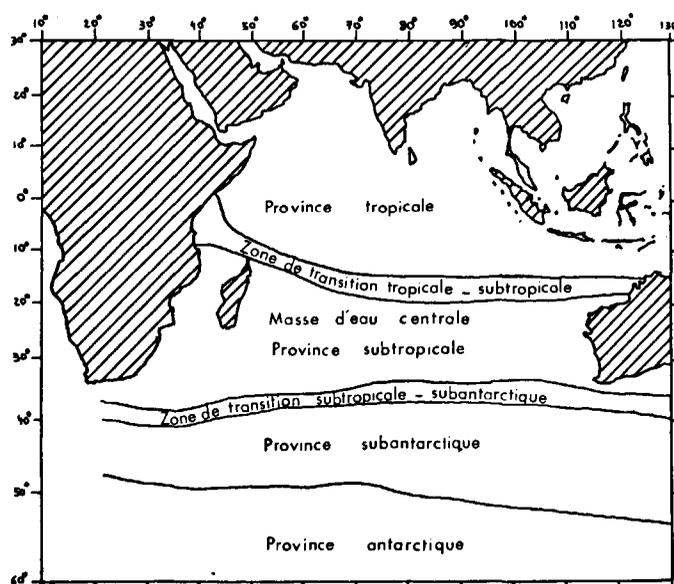


Figure 6
Principales masses d'eau de l'Océan Indien (modifié par Be *et al.*, 1973, d'après Sverdrup *et al.*, 1942).

Main water masses from the Indian Ocean (from Be *et al.*, 1973, after Sverdrup *et al.*, 1942).

Tableau 4

Valeurs moyennes des facteurs physico-chimiques des eaux de surface et du diamètre d'*Orbulina universa* de la surface du sédiment, dans l'Océan Indien (d'après Wyrтки et al., 1971, et Be et al., 1973).
 Average values of the physical-chemical factors of surface waters and mean diameter of *Orbulina universa* in surface sediment, of the Indian Ocean (from Wyrтки et al., 1971, and Be et al., 1973).

Température °C	Salinité	Densité g/l	Diamètre moyen µm	Localisation	
				Longitude	Latitude
11,0	34,5	26,7	400	30E	45S
18,6	35,6	24,8	550	45E	30S
25,8	35,4	23,1	600	50E	0
17,9	35,6	25,1	440	50E	30S
26,9	35,8	23,1	640	60E	10N
28,2	35,0	22,0	640	60E	0
26,1	34,8	22,6	660	60E	10S
22,5	35,1	23,6	630	60E	20S
17,7	35,6	25,6	400	60E	30S
19,8	35,3	24,5	550	65E	25S
17,9	35,5	25,6	450	65E	30S
28,2	36,5	22,5	750	70E	20N
28,7	34,8	22,1	680	70E	0
26,2	34,7	22,1	670	70E	10S
22,6	35,1	23,4	650	70E	20S
16,6	35,6	25,5	460	70E	30S
28,8	34,4	21,8	690	80E	0
26,5	34,6	22,3	660	80E	10S
22,0	35,1	23,6	670	80E	20S
20,0	35,5	24,3	600	80E	25S
17,0	35,8	25,8	475	80E	30S
28,0	33,5	20,8	770	85E	15N
21,8	33,5	20,9	750	90E	15N
21,8	35,1	24,0	660	90E	20S
12,0	35,4	26,6	400	90E	35S
25,5	34,4	22,5	670	110E	15S
18,1	35,7	25,7	500	110E	30S

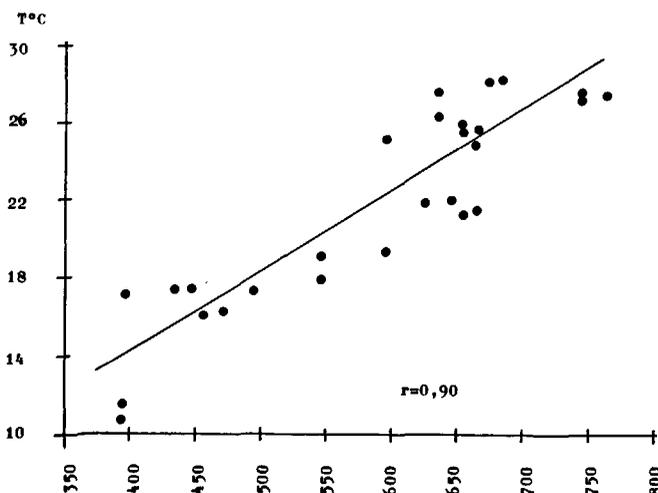


Figure 7

Relation entre DOR et la température (d'après les données de Wyrтки et al., 1971, et Be et al., 1973).
 r = coefficient de corrélation.

Relationship between DOR and temperature (after the data from Wyrтки et al., 1971, and Be et al., 1973).
 r = correlation coefficient.

Erreur moyenne par cette relation : ± 29,78 µm.

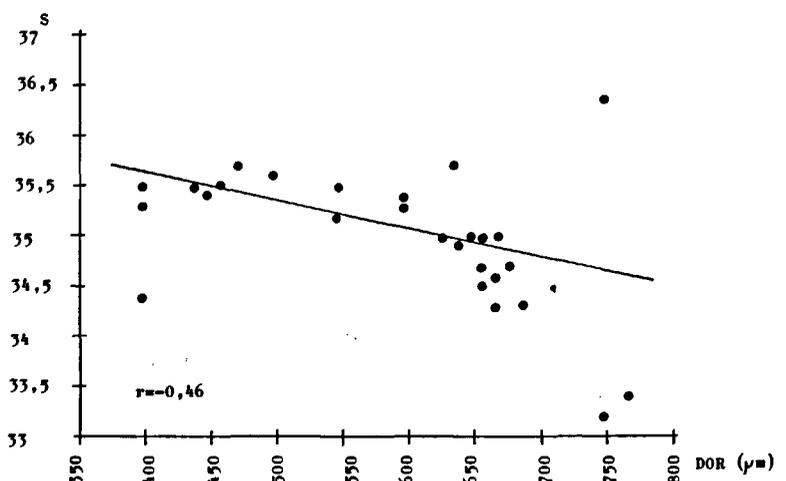
Par la suite nous noterons cette relation : F(d,S).

Le facteur dominant, la densité ($d = \sigma_t$), représente l'interaction entre la température et la salinité. La température n'intervient pas dans cette relation, elle peut être considérée comme un facteur ayant une faible influence directe sur le diamètre des tests; son action s'opère par l'intermédiaire de la densité à laquelle elle est étroitement liée (voir fig. 10). Ceci explique la bonne corrélation positive entre la température et le diamètre moyen (fig. 7). Par contre, la corrélation peu significative entre la salinité et le diamètre moyen (fig. 8) montre bien que la salinité, qui est elle-même liée à la densité (fig. 10), possède une influence sur le diamètre des orbulines qui lui est propre, non entièrement masquée

Figure 8

Relation entre DOR et la salinité (d'après les données de Wyrтки et al., 1971, et Be et al., 1973).
 r = coefficient de corrélation.

Relationship between DOR and salinity (after the data from Wyrтки et al., 1971, and Be et al., 1973).
 r = correlation coefficient.



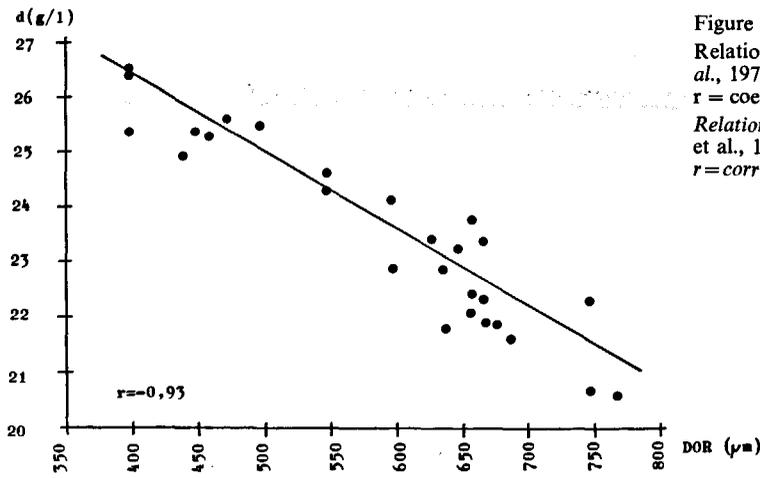


Figure 9
Relation entre DOR et la densité (d'après les données de Wyrтки et al., 1971, et Be et al., 1973).
 r = coefficient de corrélation.
Relationship between DOR and density (after the data from Wyrтки et al., 1971, and Be et al., 1973).
 r = correlation coefficient.

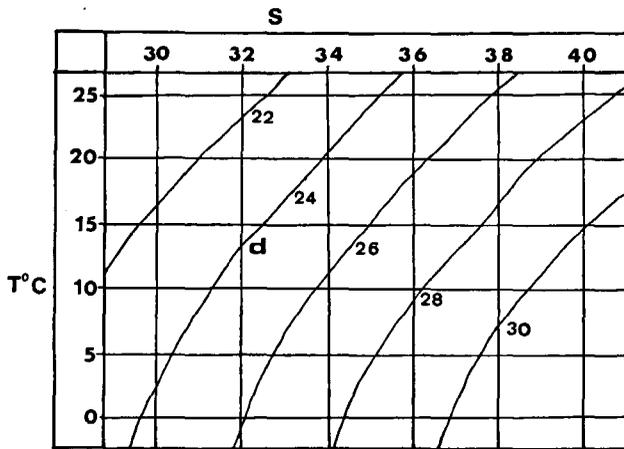


Figure 10
Variations de la densité (d en g/l) en fonction de la salinité et de la température (d'après Ivanoff, 1972).
Density variations in regard to salinity and temperature; density, d, in g/l (from Ivanoff, 1972).

par la bonne corrélation négative entre le diamètre moyen et la densité (fig. 9).

Cette relation constitue un modèle interprétatif de la variabilité du diamètre moyen d'un échantillon d'orbulines. Il s'applique aisément aux individus mesurés sur le fond de l'Océan Indien, avec une erreur moyenne de 5%.

Les données, recueillies par ces mêmes auteurs, concernant la répartition et l'abondance d'*Orbulina universa* dans l'Atlantique Nord, donnent des résultats similaires; nous pensons donc que le modèle établi ci-dessus, peut s'appliquer à tous les océans.

RÉSULTATS

Analyse quantitative d'*Orbulina universa* (fig. 11)

Elle est effectuée à partir de quatre forages. *Orbulina universa* représente rarement plus de 5% des foraminifères planctoniques fossiles.

L'espèce est présente dans les intervalles I et III, proches des conditions écologiques actuelles : les assem-

blages de foraminifères planctoniques y sont similaires, mais la composition en foraminifères benthiques indiquerait une fertilité plus élevée des eaux durant le stade interglaciaire par rapport au stade I (Holocène : Halicz, Reiss, 1981 ; Luz, Reiss, 1983). Notons que le pourcentage d'*Orbulina universa* augmente à la fin du stade III dans le golfe d'Aqaba (PC 74, PC 71).

L'espèce est absente dans l'intervalle glaciaire, sauf à sa base; par contre elle est présente dans le forage V14-122 de la Mer Rouge. Actuellement, en Mer Rouge, *Orbulina universa* vit de préférence à des profondeurs de 50 à 100 m, à des températures de $21,7 \pm 2,9^\circ\text{C}$, mais on la connaît à des températures de

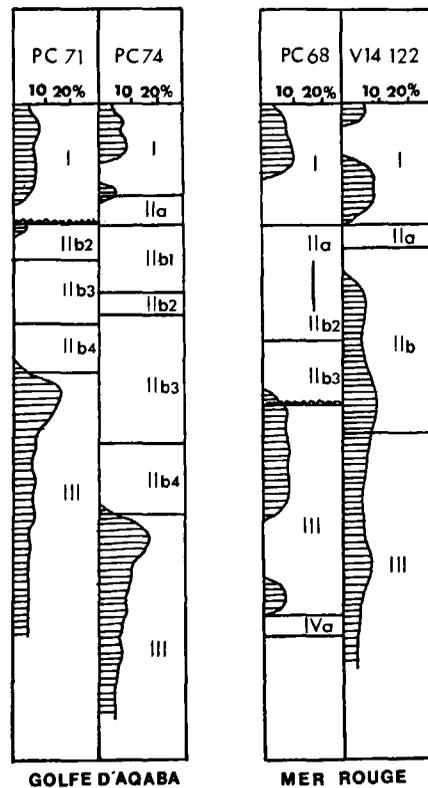


Figure 11
Répartition quantitative d'*Orbulina universa* dans quatre carottes (données fournies par Reiss).
~ ~ ~ : lacune de sédimentation.
Quantitative distribution of *Orbulina universa* in four cores (data from Reiss).
~ ~ ~ : hiatus of sedimentation.

12°C dans l'Atlantique Nord (Be, Hamlin, 1967). Les organismes fossiles et les rapports isotopiques indiquent que, durant le stade glaciaire, la température des eaux de surface était basse, mais supérieure à 14°C en Mer Rouge et dans le golfe d'Aqaba. De plus, il y avait une baisse du niveau de la mer et une réduction des circulations thermo-halines par les détroits. Cela entraîne une augmentation considérable de la salinité, une croissance du temps de stagnation des eaux et de la fertilité en zone photique (Reiss *et al.*, 1980).

La distribution d'*Orbulina universa* est parallèle à celle de *Globigerinoides sacculifer* (Reiss *et al.*, 1980). L'absence de cette dernière dans l'intervalle II s'expliquerait par la température car cette forme ne supporte que des températures supérieures à 17°C, mais elle survit dans des milieux à forte salinité et forte densité. Les miliolidés, nombreux dans cet intervalle, sont caractéristiques d'eaux hyperhalines. On est donc tenté d'expliquer l'absence d'*Orbulina universa* dans l'intervalle glaciaire par la forte salinité plutôt que par la température. Les conditions moins salines de la Mer Rouge seraient la cause de sa présence dans l'intervalle glaciaire du forage V14-122.

Application du modèle interprétatif de la variabilité d'*Orbulina universa*

Nous allons confronter le modèle interprétatif de la variabilité du diamètre moyen d'*Orbulina universa* et les résultats de l'analyse biométrique avec :

— les données paléocéanographiques du quaternaire récent du golfe d'Aqaba et du nord de la Mer Rouge (Reiss *et al.*, 1980; Halicz, Reiss, 1981),

— les caractères océanographiques actuels du golfe d'Aqaba et de la Mer Rouge (Klinker *et al.*, 1976; 1978; Levanon-Spanier *et al.*, 1979).

Adaptation des corrélations observées dans l'Océan Indien au golfe d'Aqaba

Le diamètre moyen des échantillons du golfe d'Aqaba varie de 400 à 500 µm environ (tab. 3). Dans l'Océan Indien, de tels diamètres sont observés dans la partie sud de la masse d'eau centrale. De plus, c'est dans cette zone que le pourcentage d'*Orbulina universa* vivante est

— température élevée : 21 à 26°C,

— faible taux nutritif.

Masse d'eau centrale (mai à octobre)

— forte densité : 26,5 g/l,

— salinité élevée : 35,5 à 35,9,

— température assez basse : 13 à 18°C,

— faible taux nutritif.

La température n'étant qu'un facteur tertiaire, le golfe d'Aqaba est tout à fait comparable à la partie sud de la masse d'eau centrale. Les fortes valeurs de densité du golfe par rapport à celles de la masse d'eau centrale, impliqueraient normalement un diamètre inférieur à 400 µm. Mais comme la densité est liée à la salinité et à la température, il y a un effet de balance que provoque la température élevée du golfe, bien que ce soit la salinité qui domine.

Application du modèle d'interprétation du diamètre des orbulines

Les mesures des facteurs physico-chimiques du golfe d'Aqaba ont été effectuées d'avril à octobre 1974-1975 par Klinker *et al.* (1976).

Trois stations de mesures situées du nord au sud du golfe d'Aqaba ont donné les résultats suivants (tab. 5) : Le diamètre des orbulines de l'holocène et du pléistocène du golfe d'Aqaba, du Nord vers le Sud, est illustré dans le tableau 6.

Il ressort de la comparaison des tableaux 5 et 6 que :

a) les valeurs des diamètres des orbulines augmentent du Nord vers le Sud, aussi bien celles mesurées sur les fossiles que celles obtenues par la relation $DOR = F(d,S)$;

b) les valeurs des diamètres obtenus par la relation sont tout à fait comparables à celles qui ont été mesurées.

B600 provient du nord du golfe d'Aqaba où règnent des conditions écologiques extrêmes (densité et salinité très élevées); ceci explique peut-être la différence de valeur de DOR par rapport à celle obtenue par la relation du modèle et la valeur élevée anormale de NPP (fig. 4).

Tableau 5

Diamètres d'*Orbulina universa* obtenus par la relation du modèle : $DOR = F(d,S)$, dans le golfe d'Aqaba.
Orbulina universa diameters obtained by the model relation: $DOR = F(d,S)$, in the Gulf of Aqaba.

Stations	Latitude Nord	Longitude Est	T°C	S	d(g/l)	DOR par F(d,S) (µm)
A	29°30'	34°57'	24,0	40,7	27,9	424,40
E	28°34'	34°55'	24,5	40,6	27,7	435,86
H	27°54'	34°28'	25,0	40,7	27,5	451,34

le plus important (> 15% des foraminifères planctoniques). Il s'agit d'abord de comparer les caractères hydrographiques des eaux d'été du golfe d'Aqaba avec ceux de la partie sud de la masse d'eau centrale.

Golfe d'Aqaba (avril à octobre)

— forte densité : 27,5 à 28,2 g/l,

— forte salinité : 40,2 à 41,

Tableau 6

Diamètres moyens d'*Orbulina universa* dans le golfe d'Aqaba.
Orbulina universa mean test diameters in the Gulf of Aqaba.

Échantillons	Latitude Nord	Longitude Est	DOR (µm)
B600	29°11'	34°47'	390,80
D700	28°50'	34°42'	437,70
C800-C300	28°18'	34°31'	453,10-484,30

On peut conclure que :

- les orbulines du golfe d'Aqaba réagissent aux mêmes facteurs écologiques que celles de l'Océan Indien;
- la relation du modèle d'interprétation du diamètre s'applique bien aux échantillons fossiles du golfe d'Aqaba;
- les valeurs actuelles des facteurs physico-chimiques semblent être peu différentes durant l'holocène et le dernier stade interglaciaire, ce qui sera développé par la suite.

INTERPRÉTATION ET CONCLUSION

Analyse des groupes de la classification hiérarchique en fonction de DOR

Dans le golfe d'Aqaba et le nord de la Mer Rouge, il existe un gradient Nord-Sud de croissance de température et décroissance de densité et salinité.

Groupes 1 et 2

— Stade interglaciaire : D700, C300, C800 sont issus du golfe d'Aqaba, les diamètres moyens de ces échantillons d'orbulines sont liés aux valeurs des facteurs physico-chimiques actuels. A200 provient du nord de la Mer Rouge; le diamètre de cet échantillon (458,90 μm) est assimilable à celui des échantillons C300 et C800; les conditions écologiques devaient être les mêmes dans les deux secteurs durant le stade interglaciaire, ce qui indiquerait un gradient de densité, salinité et température très faible, voire nul.

— Holocène : A400 provient du nord de la Mer Rouge; le diamètre moyen de 502 μm peut être attribué au gradient actuel de densité, salinité et température : ce gradient est présent durant l'holocène alors qu'il est apparemment absent durant le stade interglaciaire.

Groupe 3

— Stade interglaciaire : V100 provient en fait de la base de l'intervalle II; DOR = 583,90 μm . Étant donné la position géographique du forage V14-122, le fort diamètre observé en V100 soutient l'existence du gradient au sud du forage PC 68. Rappelons que dans le forage V14-122, *Orbulina universa* est présente dans l'intervalle II; nous avons attribué cette présence à une salinité moins élevée. D'après la relation du modèle d'interprétation du diamètre, DOR = 588 μm correspond à une densité de 24 g/l et une salinité de 38,5 à 25°C.

— Holocène : A500 possède un fort diamètre : 515,50 μm , que l'on peut expliquer comme celui de A400 par le gradient. La différence de diamètre entre A500 et A400 indiquerait l'existence d'une aridification climatique progressive, soulignée par plusieurs auteurs (Reiss *et al.*, 1980; Halicz, Reiss, 1981), durant l'holocène (augmentation de densité entraînant une diminution de DOR).

Groupe 4

B600 prélevé dans l'holocène a le diamètre moyen le plus faible : 390,80 μm . Sa situation géographique intervient : le nord du golfe possède la densité et la salinité maximale.

Il semblerait donc qu'il y ait eu une différence dans l'intensité du gradient Nord-Sud de densité, salinité et température. Ce gradient est similaire à l'actuel durant l'holocène, alors qu'il serait beaucoup moins prononcé durant l'intervalle interglaciaire : il se manifesterait surtout au sud de la latitude 27°S. Cela peut être confirmé par les foraminifères benthiques, ces derniers indiquent une fertilité plus élevée dans l'intervalle III par rapport à l'holocène; en effet, une baisse du niveau marin entraîne une restriction des échanges d'eau par les détroits, une diminution de l'intensité des gradients et une augmentation de la fertilité.

CONCLUSION

Cette étude a pu être réalisée grâce à la modélisation de la variabilité d'*Orbulina universa* en fonction des principaux paramètres physico-chimiques des eaux marines. La fonction établie, DOR = F(d,S), nous montre l'importance que possède la densité, c'est-à-dire l'interaction de la température et de la salinité, sur la variabilité du diamètre d'*Orbulina universa*.

Les connaissances actuelles sur l'écologie d'*Orbulina universa* peuvent s'appliquer sans trop de risque au quaternaire récent. La cohérence des résultats obtenus par le modèle le confirme.

Cette étude a en outre l'intérêt de compléter le travail de reconstitution paléocéanographique réalisé avec les foraminifères planctoniques et benthiques, pris globalement. En considérant une seule espèce de foraminifère planctonique, nous avons pu obtenir des renseignements d'ordre paléocéanographique qui n'avaient pas été décelés par une observation globale de tous les foraminifères planctoniques, à savoir :

- une forte salinité durant le dernier intervalle glaciaire;
- les variations du gradient Nord-Sud de densité, salinité et température;
- l'évolution dans le temps de ce gradient : durant l'holocène, il est similaire au gradient actuel, alors que durant le dernier intervalle interglaciaire du pléistocène, il serait beaucoup moins prononcé, témoignant ainsi d'une baisse du niveau marin de la Mer Rouge entraînant une restriction des échanges d'eau par les détroits.

Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à M. le Professeur Z. Reiss, qui m'a procuré le matériel et qui m'a permis de travailler au sein de son laboratoire de l'Université Hébraïque de Jérusalem.

Je remercie M^{me} C. Ruget qui m'a guidé dans l'évaluation de cette étude, constituant une partie de ma thèse de troisième cycle.

Mes remerciements vont aussi à MM. les Professeurs Mouterde (Institut Catholique de Lyon), David et

Roux (Université de Lyon), qui ont bien voulu relire le manuscrit en y apportant d'intéressantes critiques et suggestions.

Je remercie la rédaction et les rapporteurs, dont les critiques ont permis d'améliorer ce texte.

RÉFÉRENCES

- Be A. W. H., Hamlin W. H., 1967. Ecology of recent planktonic foraminifera. Part 3: Distribution in the North Atlantic during the summer of 1962, *Micropaleontology*, **13**, 1, 87-107.
- Be A. W. H., Tolderlund D. S., 1971. Distribution and ecology of living planktonic foraminifera in surface waters of the Atlantic and Indian Ocean, in: *The micropaleontology of oceans*, Cambridge Univ. Press, London, 105-149.
- Be A. W. H., Duplessy J. C., 1976. Subtropical convergence fluctuations and quaternary climates in the middle latitude of the Indian Ocean, *Science*, **194**, 4263, 419-421.
- Be A. W. H., Hutson W. H., 1977. Ecology of planktonic foraminifera and biogeographic patterns of life and fossil assemblage in the Indian Ocean, *Micropaleontology*, **23**, 4, 369-415.
- Be A. W. H., Harisson S. M., Lott L., 1973. *Orbulina universa* d'Orbigny in the Indian Ocean, *Micropaleontology*, **19**, 2, 150-192.
- Benzecri J.-P. et al., 1980. *L'analyse des données. 2 : L'analyse des correspondances*, Dunod, Paris, 632 p.
- Berggren W. A., Boersma A., 1969. Late Pleistocene and Holocene planktonic foraminifera from the Red Sea, in: *Hot brines and recent heavy metal deposits in the Red Sea*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 282-298.
- Deuser W. G., Ross E. H., Waterman L. S., 1976. *Glacial and pluvial periods: their relationship revealed by Pleistocene sediments of the Red Sea and the Gulf of Aden*, Woods Hole Oceanographic Inst., Part 2, 1168-1170.
- Emiliani C., 1954. Depth habitats of some species of pelagic foraminifera as indicated by oxygen isotope ratios, *Am. J. Sci.*, **252**, 2, 149-158.
- Goldberg P., 1977. Late Quaternary stratigraphy of Gebel Maghara, in: *Prehistoric investigations in Gebel Maghara, Northern Sinai*, edited by O. Bar-Yosef and J. L. Phillips, Qedem, n° 7, 11-31.
- Gvirtzman G., Buchbinder B., 1977. Recent and Pleistocene coral reefs and coastal sediments of the Gulf of Elat, *Proc. Second International Symposium on Fossil Corals Reefs*, Paris, Mém. BRGM, 163-170.
- Gvirtzman G., Buchbinder B., Sneh A., Nir Y., Friedman G. M., 1977. Morphology of the Red Sea fringing reefs: a result of the erosional pattern of the last-glacial low-stand sea level and the following Holocene recolonization, *Proc. Second International Symposium on Fossil Corals and Coral Reefs*, Paris, 480-491.
- Halicz E., Reiss Z., 1981. Paleoecological relations of *Foraminifera* in a desert-enclosed sea—the Gulf of Aqaba (Elat), Red Sea, *Mar. Ecol.*, **2**, 15-34.
- Hall J. K., 1976. New bathymetric chart of the Straits of Tiran, *Israel J. Earth-Sci.*, **24**, 69-72.
- Hall J., Ben Avraham Z., 1978. New bathymetric map of the Gulf of Elat (Aqaba), *Tenth Inter. Congr. Sedimentology, Jerusalem*, 285.
- Hecht A. D., Be A. W. H., Lott L., 1976. Ecologic and paleoclimatic implications of morphologic variation of *Orbulina universa* in the Indian Ocean, *Science*, **194**, 4263, 422-424.
- Hemleben C., Spindler M., 1983. Recent advances in living planktonic foraminifera, *Utrecht Micropaleontol. Bull.*, **30**, 141-170.
- Herman Y., 1968. Evidence of climatic changes in Red Sea cores: means of correlation of quaternary successions, *Congr. Inter. Assoc. Quat. Res., Univ. Utah Press*, 325-348.
- Ivanoff A., 1972. *Introduction à l'océanographie. Propriétés physiques et chimiques des eaux de mer*, Librairie Vuibert, Paris.
- Klinker J., Reiss Z., Koprach C., Levanon I., Harpaz H., Halicz E., 1976. Observations of the Circulation Pattern in the Gulf of Elat (Aqaba), Red Sea, *Israel J. Earth-Sci.*, **25**, 85-103.
- Klinker J., Reiss Z., Koprach C., Levanon I., Harpaz H., Shapiro Y., 1978. Nutrients and biomass distribution in the Gulf of Aqaba (Elat), Red Sea, *Mar. Biol.*, **45**, 53-64.
- Le Calvez J., 1936. Modification du test des foraminifères pélagiques en rapport avec la reproduction : d'*Orbulina universa* d'Orbigny et *Tretomphalus bulloides* d'Orbigny, *Ann. Protistol.*, **15**, 125-133.
- Levanon-Spanier I., Padan E., Reiss Z., 1979. Primary production in a desert-enclosed sea—the Gulf of Elat (Aqaba), Red Sea, *Deep-Sea Res.*, **26**, 6A, 673-685.
- Luz B., Reiss Z., 1983. Stable carbon isotopes in Quaternary foraminifera from the Gulf of Aqaba (Elat), Red Sea, *Utrecht Micropaleontol. Bull.*, **30**, 129-140.
- Por D. D., 1978. *Lossepien Migration. Ecological studies 23*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Reiss Z., Halicz E., Perelis L., 1974. Planktonic foraminifera from recent sediments in the Gulf of Elat, *Israel J. Earth. Sci.*, **23**, 69-105.
- Reiss Z., Luz B., Almogi-Labin A., Halicz E., Winter A., Wolf M., 1980. Late quaternary paleoceanography of the Gulf of Aqaba (Elat), Red Sea, *Quat. Res.*, **14**, 294-308.
- Sverdrup H. V., Johnson M. W., Fleming R. H., 1942. *The Oceans*, Prentice Hall, New York, 1-1087.
- Taviani M., 1984. Sedimentation in a mini-propagating rift (Nereus Trough; central Red Sea): an oxygen stable isotope approach, *5^e Congrès Européen de Sédimentologie, Marseille*, 427-428.
- Wyrtki K., Bennett E. B., Rochford D. J., 1971. *Oceanographic atlas of the International Indian Ocean Expedition*, National Sci. Found., Washington, 531 p.