

OBSERVATION D'UN MAXIMUM SECONDAIRE DE NITRITE DANS L'ATLANTIQUE TROPICAL (DÔME DE GUINÉE)

BRUNO VOITURIEZ ET ALAIN HERBLAND

*Océanographes O.R.S.T.O.M.
Centre de Recherches Océanographiques, B.P. V 18, Abidjan, Côte d'Ivoire*

RÉSUMÉ

Il se forme dans le Dôme de Guinée sous la thermocline un minimum subsuperficiel d'oxygène. Lorsque dans certaines conditions de circulation ce minimum atteint des valeurs aussi faibles que 0.5 ml/l il apparaît un maximum secondaire de nitrite qui semble pouvoir être expliqué seulement par un ralentissement des processus de nitrification.

ABSTRACT

The high productivity of the Guinea Dome forms an oxygen minimum just beneath the thermocline. The very low horizontal motions in the center of the Dome can isolate water cells where the remineralization processes lower the oxygen content to 0.5 ml/l and where a secondary nitrite maximum is formed by nitrification processes less rapid than normal.

INTRODUCTION

Dans les régions tropicales il existe une couche de nitrite appelée maximum primaire que l'on rencontre partout associée à la « nitratocline ». La permanence de ce maximum et de sa structure ont amené VOITURIEZ et HERBLAND (1977) à supposer que ce maximum primaire avait une seule origine : la réduction du nitrate par le phytoplancton dans des conditions limitantes de lumière suivant le processus mis en évidence par VACCARO et RYTHER (1960).

Un maximum secondaire a été observé en profondeur dans le Pacifique Est, dans la couche du minimum d'oxygène pour des valeurs inférieures à 0.1 ml/l (BRANDHORST 1959, WOOSTER *et al.* 1965, WOOSTER 1967). En raison de l'extrême pauvreté en oxygène de cette couche BRANDHORST (1959) a supposé que ce nitrite était formé par la réduction

bactérienne du nitrate. Cette hypothèse a été vérifiée de plusieurs manières. GOERING (1968) a montré, en utilisant les techniques de l'azote 15 , que la dénitrification se poursuivait jusqu'à l'azote. CARLUCCI et SCHUBERT (1969) ont isolé dans des échantillons récoltés dans le minimum d'oxygène au large du Pérou des bactéries réductrices qui produisaient du nitrite. Enfin la comparaison de la distribution observée du nitrate avec la distribution normale ou attendue déduite de celle du phosphate (THOMAS 1966) de l'U.A.O. (FIADREIRO et STRICKLAND 1968, CLINE et RICHARDS 1972) ou du « nitrate équivalent » défini par CODISPOTI (1973) fait apparaître un déficit de nitrate au niveau du maximum secondaire de nitrite.

Il n'a pas été observé jusqu'à présent, de maximum secondaire dans l'Atlantique où les valeurs du minimum d'oxygène ne sont pas inférieures à 0.5 ml/l. Cependant dans le Dôme de Guinée situé

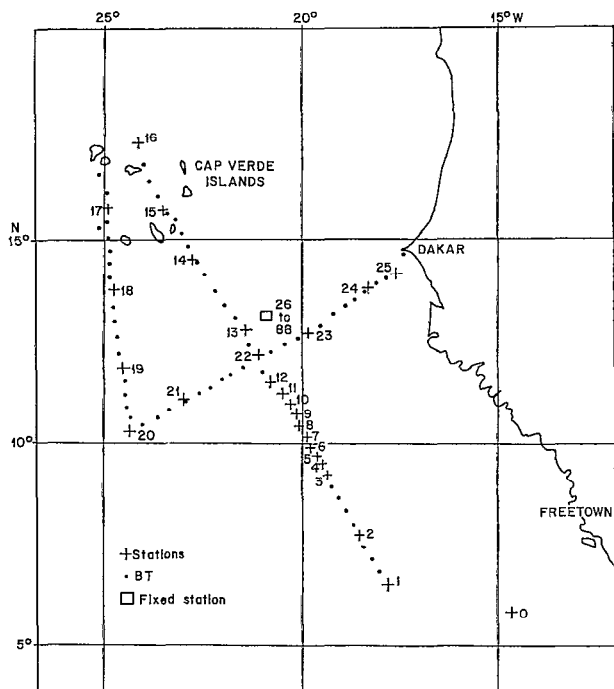


Fig. 1. — Plan de la campagne 7313 du N/O CAPRICORNE
17 août-4 septembre 1973.

dans l'Atlantique Est au large du Sénégal, VOITURIEZ et DANDONNEAU (1974) ont signalé l'existence d'un double maximum de nitrite dont le plus profond associé à un minimum subsuperficiel d'oxygène de 0.5 ml/l. C'est ce maximum secondaire de nitrite et ce minimum d'oxygène qui sont étudiés ici.

Les données utilisées sont celles de la campagne Dôme de Guinée du N. O. « CAPRICORNE » (CAP 7313) qui comportait la description du Dôme suivant deux radiales croisées (st. 1 à 16 et 20 à 25) et une étude pendant 5,5 jours des processus de production en un point fixe situé au centre du Dôme (st. 26-88) (fig. 1). Les principaux résultats de cette campagne ont été présentés d'autre part (VOITURIEZ et DANDONNEAU 1974, HERBLAND et PAGES 1975).

LE MINIMUM SUBSUPERFICIEL D'OXYGÈNE

Les mesures d'oxygène ont été faites à l'aide d'une sonde PTSO (Bissett-Berman) calibrée préalablement par la méthode de Winkler.

Le point remarquable de la distribution verticale de l'oxygène est l'existence d'un minimum subsuperficiel situé à la base de la thermocline (fig. 2) et distinct du minimum profond situé vers 400 m de profondeur décrit par BUBNOV (1966). VOITURIEZ et

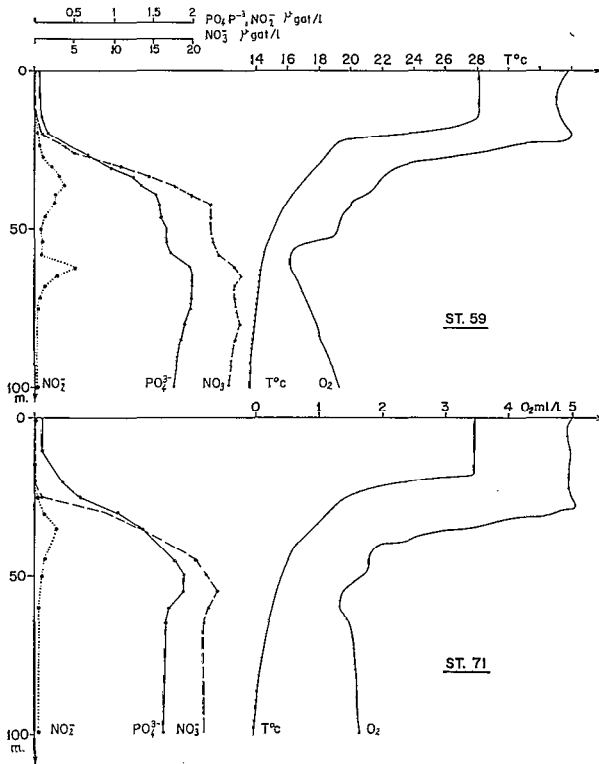
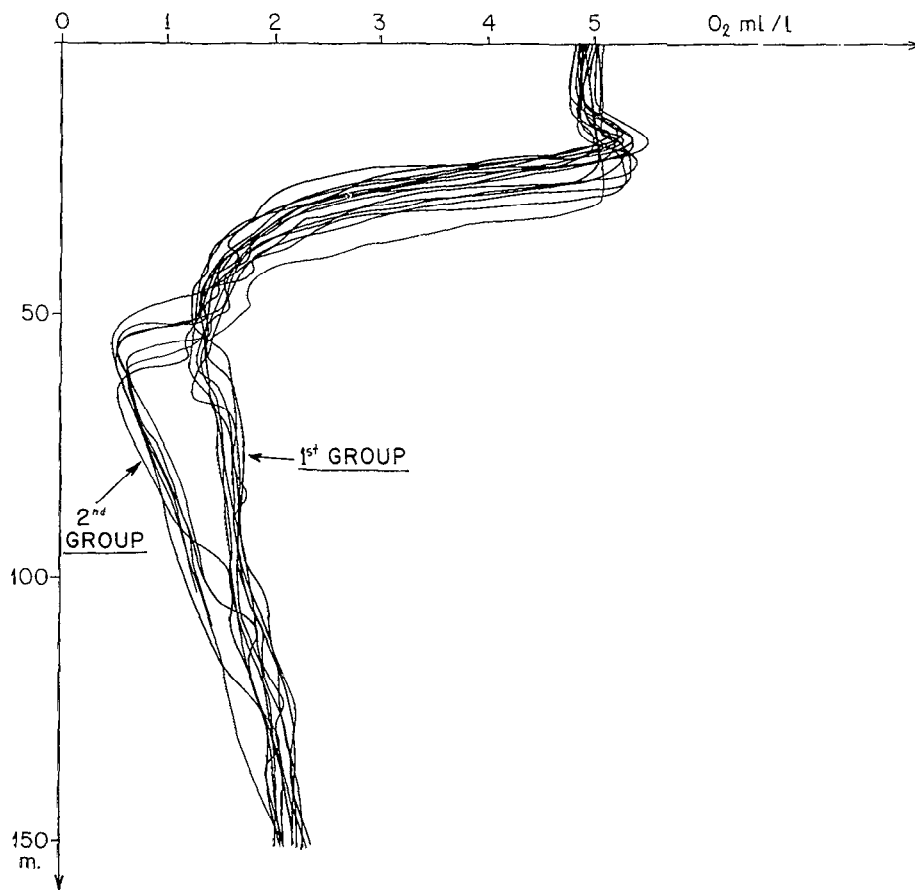


Fig. 2. — Profils verticaux de la température, de l'oxygène et des sels nutritifs à la station fixe.

- 1^{er} groupe (O_2 min = 1.30 ml/l) : st. 71
2^e groupe (O_2 min = 0.57 ml/l) : st. 59

DANDONNEAU (1974) et VOITURIEZ et CHUCHLA (sous presse) ont montré que les plus faibles valeurs de ce minimum d'oxygène étaient situées dans la partie centrale du Dôme au cœur de la circulation cyclonique qui lui donne naissance. On peut par conséquent en conclure que le minimum subsuperficiel d'oxygène se renforce localement dans le Dôme en raison de la forte production que l'on y observe ($1 \text{ g C m}^{-2}/\text{j}$) et des très faibles mouvements horizontaux mesurés au centre du Dôme.

Au point fixe (st. 26-88) les stations se distribuent en deux groupes distincts suivant la valeur du minimum d'oxygène subsuperficiel : un premier groupe (groupe 1) où la valeur du minimum est en moyenne de 1.30 ml/l et un deuxième groupe (groupe 2) où elle est seulement de 0.57 ml/l (fig. 3). La répartition dans le temps de ces deux groupes de stations fait apparaître deux périodes à fort minimum d'oxygène : de la station 26 à la station 39 puis de la station 59 à la station 66 avec dans chacune de ces plages une station appartenant à l'autre groupe (st. 35 et 64) (fig. 4). Le passage d'une situation à l'autre se fait de façon brutale sans transition :



Groupe 1 : 44 , 47 , 50 , 53 , 68 , 71 , 74 , 88.

Groupe 2 : 26 , 28 , 29 , 32 , 38 , 59 , 65.

Fig. 3. — Distribution verticale de l'oxygène durant la station fixe au centre du Dôme de Guinée.

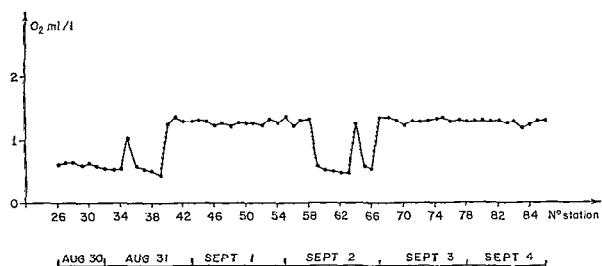


Fig. 4. — Évolution de la valeur du minimum d'oxygène au point fixe.

les stations étaient faites toutes les deux heures le navire dérivant très faiblement. Ainsi entre la station 39 faite à 14 h 00 et la station 40 à 16 h 00 le 31 août on passe d'une situation à l'autre alors

que la dérive était inférieure à 0.5 mille. Le point fixe correspondait donc à une situation critique située à la frontière de deux zones caractérisées par des minimums d'oxygène très différents entre lesquels les mélanges étaient très faibles.

LE DOUBLE MAXIMUM DE NITRITE

Le maximum secondaire de nitrite (fig. 2) a été observé dans le minimum subsuperficiel d'oxygène mais uniquement aux stations du groupe 2 (O_2 min. = 0.57 ml/l). Aux autres stations la distribution du nitrite présente un seul maximum : le maximum primaire que l'on rencontre associé à la nitratocline dans l'ensemble des régions tropicales et attribué à la réduction du nitrate par le phytoplancton (VOITURIEZ et HERBLAND, 1977).

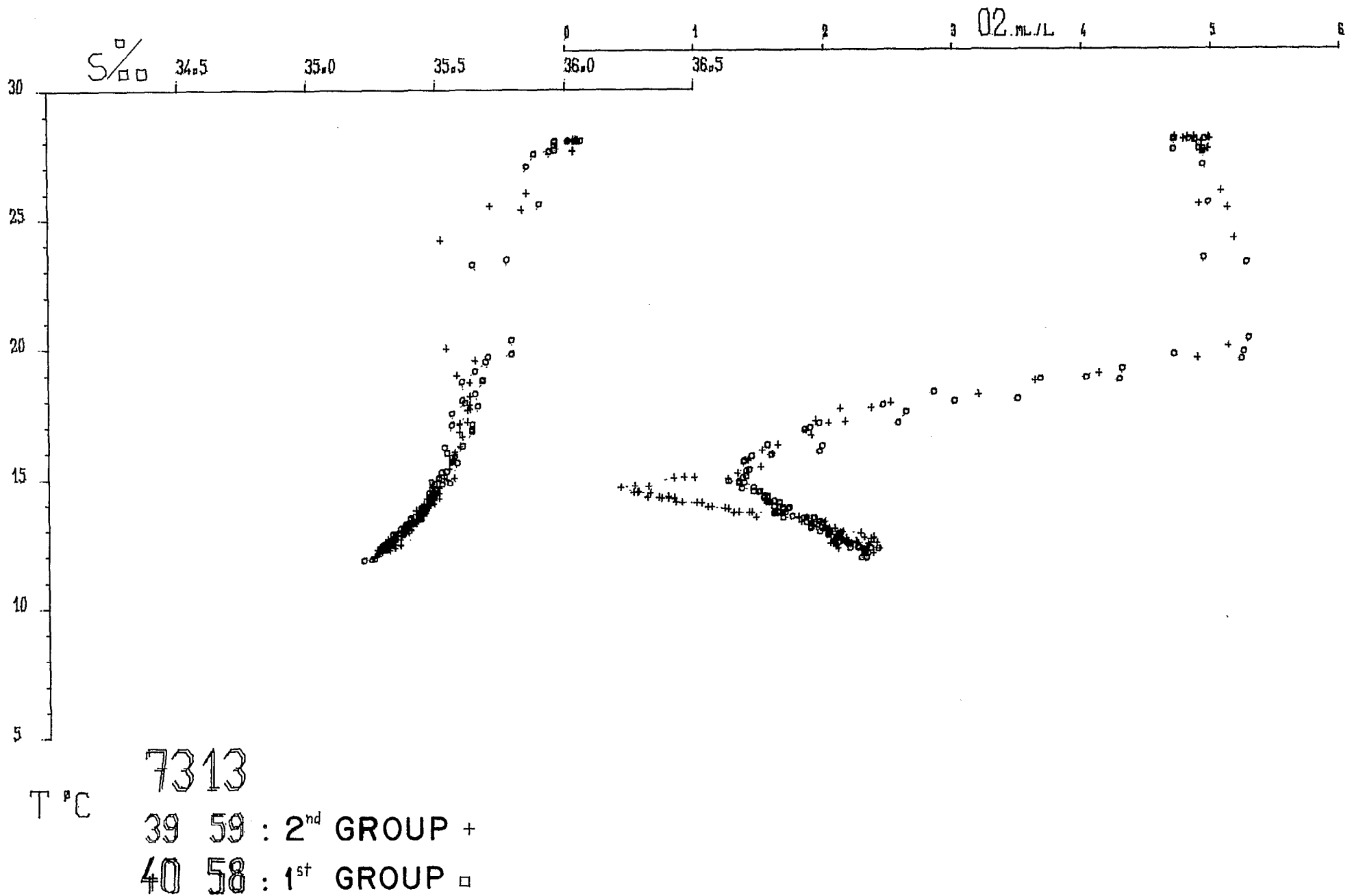


Fig. 5. — Diagrammes TS et TO₂ au point fixe. Les stations du 2^e groupe apparaissent avec un minimum très accusé d'oxygène.

Le maximum secondaire de nitrite est nettement séparé du maximum primaire et sa valeur varie de 0.2 à 0.5 $\mu\text{at g/l}$.

Les valeurs moyennes des principaux paramètres à la profondeur du minimum d'oxygène et du maximum secondaire de nitrite sont présentées dans le tableau 1 avec leur précision au risque 5 %.

TABLEAU I

Valeur moyenne des paramètres au niveau du minimum d'oxygène

	O ₂ min ml/l	NO ₂ ⁻ $\mu\text{at g/l}$	NO ₃ ⁻ $\mu\text{at g/l}$	PO ₄ ³⁻ $\mu\text{at g/l}$	Δ st cl/t
Groupe 1..... (14 stations)...	1.30 ± 0.03	0.05 ± 0.003	23.3 ± 0.4	1.84 ± 0.05	163 ± 1.4
Groupe 2..... (08 stations)...	0.57 ± 0.05	0.38 ± 0.16	26.0 ± 0.6	1.99 ± 0.07	157 ± 1.5

DISCUSSION

Le maximum secondaire de nitrite a plusieurs origines possibles; il peut avoir la même origine que le maximum primaire et n'apparaître comme maximum secondaire qu'en raison de la superposition de deux masses d'eau différentes; il peut être une

étape dans la dénitrification bactérienne comme c'est le cas dans le Pacifique, dans le minimum profond d'oxygène; il peut résulter d'une nitrification ralentie, hypothèse que n'écartent par FIADEIRO et STRICKLAND (1968) dans le Pacifique en raison des très faibles quantités de matières organiques et de la pauvreté en oxygène. Pour tester ces hypothèses on ne dispose d'aucune mesure de flux d'azote d'une forme à l'autre. L'analyse du maximum de nitrite porte donc uniquement sur la comparaison des distributions verticales des divers paramètres mesurés durant le point fixe, d'une part aux stations du groupe 1 (absence d'un maximum secondaire), et d'autre part aux stations du groupe 2 à double maximum de nitrite (st. 26, 28, 29, 32, 38, 59, 65).

1^{re} hypothèse : Réduction du nitrate par le phytoplancton

Au niveau du minimum d'oxygène les différences de densité sont extrêmement faibles et les diagrammes TS ne manifestent pas de différences décelables entre les deux groupes de stations (fig. 5). Il s'agit donc de la même masse d'eau. Elle a pour origine l'eau centrale de l'Atlantique sud qui fait mouvement vers le nord VOITURIEZ et CHUCHLA (sous presse). Néanmoins les différences de teneur en oxygène et sets nutritifs sont le reflet au sein de cette même masse d'eau de deux histoires biologiques différentes.

VOITURIEZ et DANDONNEAU (1974) ont montré

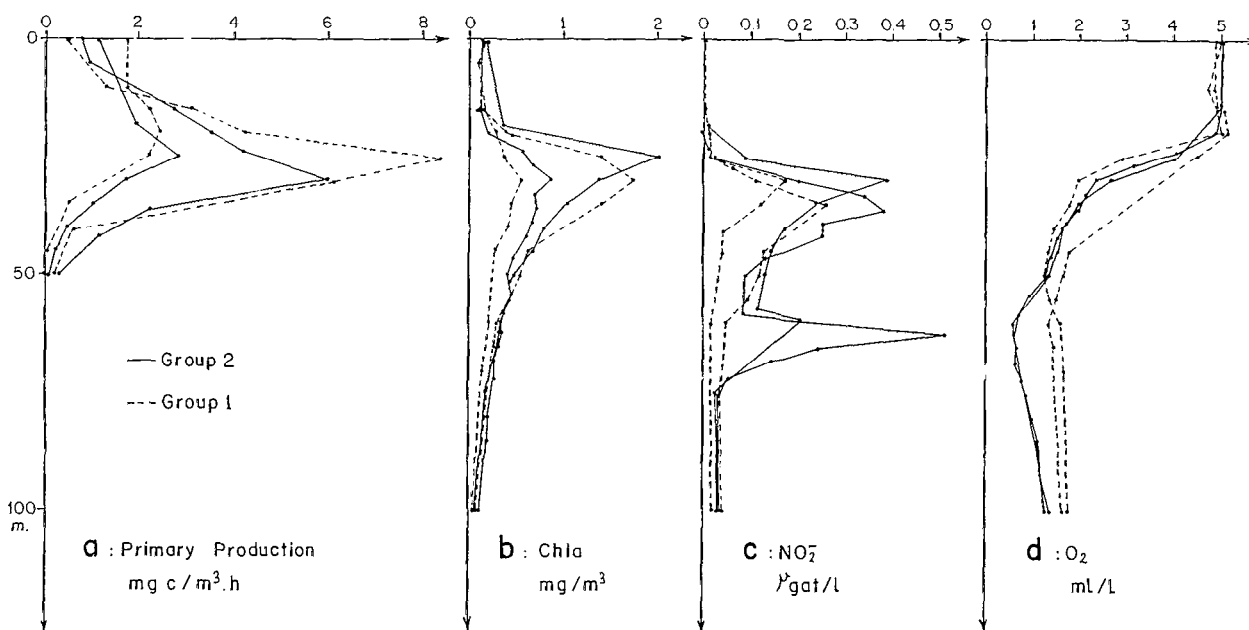


Fig. 6. — Distribution du nitrite par rapport aux paramètres de la production primaire.

Groupe 1 St. 47-71

Groupe 2 St. 26-59

que l'équilibre entre les processus physiques et biochimiques intervenant dans la distribution des divers paramètres se traduisait par une stratification remarquable permettant notamment de distinguer, thermocline, phosphatocline et nitratocline et de situer les uns par rapport aux autres les maximums de nitrite, chlorophylle, oxygène et production primaire. Il n'y a dans cette stratification aucune différence notable entre les deux groupes de stations si ce n'est évidemment l'apparition du maximum secondaire de nitrite. En particulier pour les deux groupes de stations les distributions verticales de la chlorophylle et de la production primaire ne sont pas modifiées (fig. 6) et les valeurs de biomasse (chlorophylle et zooplancton) ne sont pas différentes. VOITURIEZ et HERBLAND (1977) ont montré que le maximum primaire de nitrite était associé à la décroissance de la production primaire dans la « nitratocline ». Ce n'est pas le cas ici du maximum secondaire qui se trouve en dehors de la couche de production limitée aux 50 premiers mètres. Il n'est pas non plus possible d'établir des différences entre les distributions d'activité hétérotrophe, A T P, et phosphore organique dissous. Il n'est donc pas possible de relier les variations importantes du minimum d'oxygène aux variations locales de la production. La formation du maximum secondaire de nitrite par des processus liés à la production primaire (réduction du nitrate par le phytoplancton) analogues à ceux qui régissent la formation du maximum primaire est donc exclue. Les seules différences observées au niveau du minimum d'oxygène entre les deux groupes de stations se limitent aux teneurs en oxygène, nitrite, nitrate, phosphate.

2^e hypothèse : Réduction bactérienne du nitrate

L'association du maximum secondaire de nitrite avec un minimum d'oxygène présente une analogie avec les observations du Pacifique. Ceci peut faire penser que la dénitrification est à l'origine du maximum secondaire de nitrite. Il existe cependant deux différences essentielles. Dans le Pacifique CLINE et RICHARDS (1972) ont montré que dans le minimum profond d'oxygène les valeurs de nitrite supérieures à 0.1 $\mu\text{at g/l}$ apparaissaient seulement là où les concentrations d'oxygène étaient inférieures à 0.02 ml/l c'est à dire dans des conditions pratiquement anaérobiques. Ce n'est pas le cas ici. D'autre part dans le Pacifique la distribution verticale du nitrite et du nitrate montre que le maximum secondaire de nitrite correspond à un minimum de nitrate (CODISPOTI 1973, CARLUCCI et SCHUBERT 1969). Dans le cas présent au contraire le maximum secondaire de nitrite correspond à un maximum accusé de nitrate (fig. 2).

La notion de nitrate équivalent introduite par

CODISPOTI (1973) permet de rechercher s'il y a déficit en nitrate dans les stations à maximum secondaire de nitrite par rapport aux autres stations. Le nitrate équivalent est défini de la manière suivante :

$$\text{NO}_3 \text{ Equiv.} = \text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{O}_2 \times \frac{\Delta \text{NO}_3^-}{\Delta \text{O}_2}$$

où :

NO_3^- = Concentration observée de nitrate

NO_2^- = Concentration observée de nitrite

O_2 = Concentration observée d'oxygène

$$\frac{\Delta \text{NO}_3^-}{\Delta \text{O}_2} = \text{Rapport d'oxydation} = 16/276$$

(REDFIELD, KETCHUM and RICHARDS, 1963).

Au sein d'une même masse d'eau comme c'est ici le cas, cette grandeur devrait être conservative : toute diminution dans la masse d'eau correspond à une perte d'azote que l'on peut considérer comme une dénitrification conduisant à l'azote moléculaire. CODISPOTI (1973) et CODISPOTI and RICHARDS (1976) ont pu ainsi mettre en évidence la dénitrification au niveau du maximum secondaire de nitrite du Pacifique nord. Dans le Dôme de Guinée la dénitrification au niveau du minimum d'oxygène devrait se traduire par un déficit en « nitrate équivalent » dans les stations les plus pauvres en oxygène (2^e groupe) par rapport aux autres (1^e groupe). Le calcul a été fait pour chaque station au niveau du minimum d'oxygène d'une part et sur la tranche 45-100 m qui inclut le minimum d'oxygène et le maximum secondaire de nitrite d'autre part. Les résultats sont présentés dans le tableau II.

TABLEAU II
Nitrate équivalent dans le minimum d'oxygène

NO ₃ Equiv. $\mu\text{atg/l}$	Au niveau du minimum d'oxygène	Entre 45 et 100 m
Groupe 1.....	29.3	29.8
Groupe 2.....	30.0	30.4
Déficit.....	0.7	0.6

Les différences très faibles observées entre les deux groupes ne sont pas significatives (test de Mann-Whitney).

L'absence de déficit en nitrate, l'association avec un maximum de nitrate et les valeurs relativement

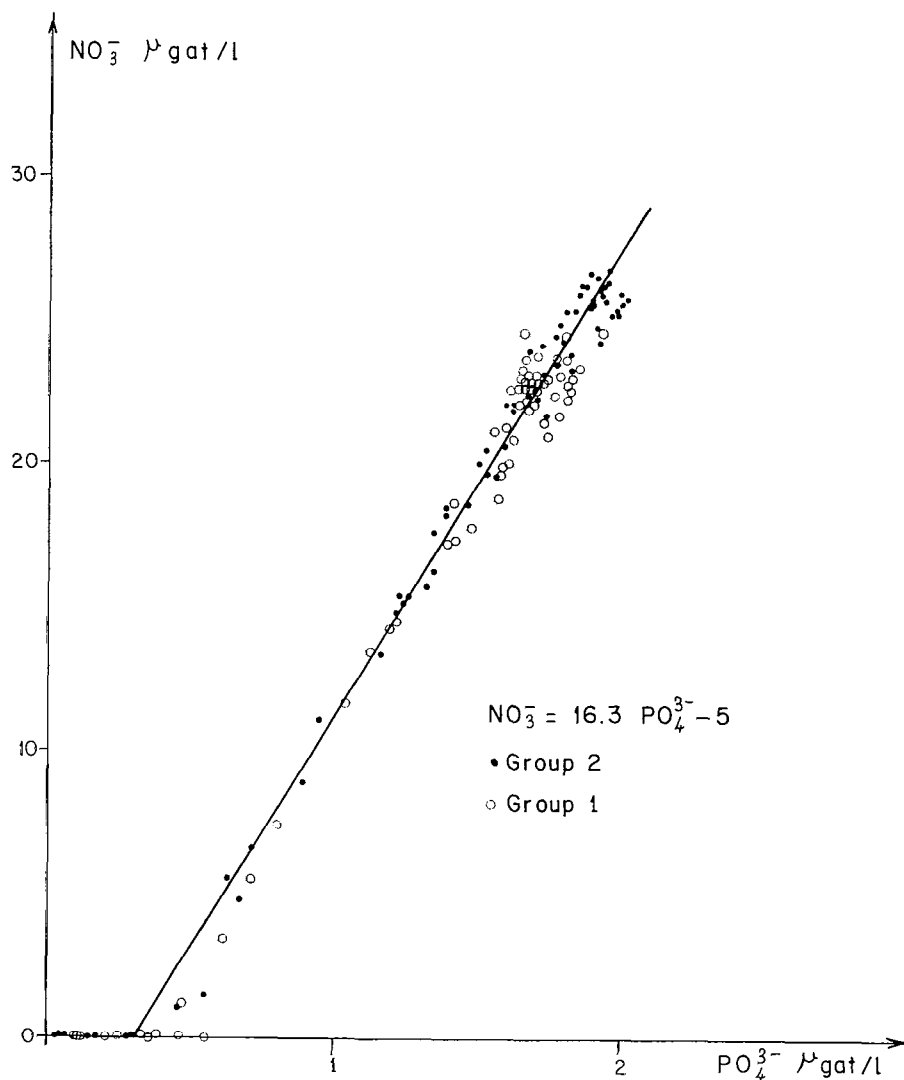


Fig. 7. — Relation Nitrate-Phosphate à la station fixe du Dôme de Guinée.

élevées d'oxygène (par rapport au Pacifique) rendent peu probable la formation du maximum de nitrite par dénitrification.

3^e hypothèse : Étape de la nitrification

Par élimination, le nitrite étape de nitrification devient l'explication la plus probable. Le seul argument dont on dispose est l'absence d'anomalie dans la distribution du nitrate, par rapport à celle des autres paramètres, le phosphate par exemple (fig. 7). A cause des faibles teneurs en matière organique, FIADÉIRO et STRICKLAND (1968) n'excluent pas complètement la possibilité d'une oxyda-

tion incomplète ou ralentie dans le minimum d'oxygène. CARLUCCI et MAC NALLY (1969) qui ont mis en évidence, à partir de cultures de bactéries nitrifiantes, la formation de nitrite à partir d'ammoniacque dans des conditions d'oxygène variables concluent que la nitrification peut intervenir dans le maximum secondaire de nitrite à des concentrations inférieures à 0.1 ml/l d'oxygène et qu'elle peut avoir une large part dans l'accumulation de nitrite là où il n'y a pas de diminution concomitante de nitrate comme c'est justement le cas ici (fig. 2). La nitrification est donc le processus le plus probable pour expliquer la formation du maximum secondaire de nitrite du Dôme de Guinée.

CONCLUSIONS

Il existe au centre du Dôme de Guinée un minimum subsuperficiel d'oxygène dont les valeurs peuvent varier très brutalement sur de courtes distances. La formation dans une même masse d'eau de minimums d'oxygène très différents indique qu'il existe dans la région centrale du Dôme de Guinée des lentilles d'eau isolées dans lesquelles les processus de minéralisation provoquent un appauvrissement en oxygène remarquable. Dans ces lentilles d'eau

apparaît un maximum secondaire de nitrite qui ne se traduit par aucune anomalie dans les distributions verticales des paramètres hydrologiques, chimiques et biologiques. Il ne semble donc pas lui correspondre un déficit en nitrate équivalent qui pourrait indiquer une dénitrification. En revanche son association avec un renforcement d'un maximum de nitrate et de phosphate et du minimum d'oxygène peut s'expliquer par une nitrification ralentie en raison de la pauvreté en oxygène.

Manuscrit reçu au Service des Publications le 13 décembre 1976.

BIBLIOGRAPHIE

- BRANDHORST (W.), 1959. — Nitrification and denitrification in the Eastern Tropical North Pacific. *J. Conseil, Conseil Perm. Intern. Exploration Mer*, 25 : 3-20.
- BUBNOV (V. A.), 1966. — Distribution patterns of minimum oxygen concentrations in the Atlantic ocean. *Oceanology*, 6 : 193-201.
- CARLUCCI (A. F.) et Mc NALLY (P. M.), 1969. — Nitrification by marine bacteria in low concentrations of substrate and oxygen. *Limnol. Oceanogr.*, 14 : 736-739.
- CARLUCCI (A. F.) et SCHUBERT (H. R.), 1969. — Nitrate reduction in sea-water of the deep nitrite maximum off Peru. *Limnol. Oceanogr.*, 14 : 187-193.
- CLINE (J. D.) et RICHARDS (F. A.), 1972. — Oxygen deficient conditions and nitrate reduction in the Eastern Tropical North Pacific Ocean. *Limnol. Oceanogr.*, 17 : 885-900.
- CODISPOTI (L. A.), 1973. — Some chemical and physical properties of the Eastern Tropical North Pacific with emphasis on the oxygen minimum layer. Univ. Wash., Dept. Ocean., Technical Report 289 : 40 pp.
- CODISPOTI (L. A.) et RICHARDS (F. A.), 1976. — An analysis of the horizontal regime of denitrification in the Eastern Tropical North Pacific. *Limnol. Oceanogr.*, 21 : 379-388.
- FIADDEIRO (M. F.) et STRICKLAND (J. D. H.), 1968. — Nitrate reduction and the occurrence of a deep nitrite maximum in the ocean of the West coast of South America. *J. Mar. Res.*, 26 : 187-201.
- GOERING (J. J.), 1968. — Denitrification in the oxygen minimum layer of the Eastern Tropical Pacific Ocean. *Deep sea Res.*, 15 : 157-164.
- HERBLAND (A.) et PAGES (J.), 1975. — L'Adénosine triphosphate (A.T.P.) dans le Dôme de Guinée. Distribution verticale et signification écologique. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. XII, n° 4 : 241-255.
- HERBLAND (A.) et PAGES (J.), 1977. — L'Adénosine triphosphate (A.T.P.) dans le Dôme de Guinée. Distribution verticale et signification écologique. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. XIV, n° 1 : 39-46.
- O.R.S.T.O.M., sér. *Océanogr.*, vol. XIII, n° 2 : 163-169.
- REDFIELD (A. C.), KETCHUM (B. H.) et RICHARDS (F. A.), 1963. — The influence of organisms on the composition of sea-water. In the Sea Vol. 2 : 26-77. M. N. HILL, E. D. GOLDBERG, C. O'D. ISELIN, and W. H. MUNK Ed. Interscience, London.
- THOMAS (W. H.), 1966. — On denitrification in the Northeastern Tropical Pacific Ocean. *Deep Sea Res.*, 13 : 1109-1114.
- VACCARO (R. F.) et RYTHER (J. H.), 1960. — Marine phytoplankton and the distribution of nitrite in the sea. *J. Conseil, Conseil Perm. Intern. Exploration Mer*, 25 : 260-271.
- VOITURIEZ (B.) et DANDONNEAU (Y.), 1974. — Relations entre la structure thermique, la production primaire et la régénération des sels nutritifs dans le Dôme de Guinée. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. XII, n° 4 : 241-255.
- VOITURIEZ (B.) et CHUCHLA (R.), 1977. — Influence of the Southern Atlantic Central Water on the distribution of salinity and oxygen in the Northeast Tropical Atlantic Ocean. (sous presse).
- VOITURIEZ (B.) et HERBLAND (A.), 1977. — Production primaire, nitrate et nitrite dans l'Atlantique Tropical. II — Distribution du nitrate et production de nitrite. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. XV, n° 1 : 57-65.
- WOOSTER (W. S.), 1967. — Further observations in the Secondary Nitrite maximum in the Northern equatorial Pacific. *J. Mar. Res.*, 25 : 154-161.
- WOOSTER (W. S.), CHOW (T. J.) et BARRETT (I.), 1965. — Nitrite distribution in Peru Current waters. *J. Mar. Res.*, 23 : 210-221.