

**La distribution des sels nutritifs  
( $\text{NO}_3$  -  $\text{NO}_2$  -  $\text{NH}_4$  -  $\text{PO}_4$  -  $\text{Si O}_3$ )  
dans l'Océan Atlantique intertropical  
oriental (région du Golfe de Guinée)**

Claude OUDOT (1)

RÉSUMÉ

*A la lumière des principes généraux gouvernant la distribution des sels nutritifs (processus physiques et biologiques) la distribution de nitrate, nitrite, ammonium, phosphate et silicate dans le Golfe de Guinée est présentée et discutée. La stratification verticale des sels les plus abondants (nitrate, phosphate et silicate) traduit l'équilibre consommation-régénération lié au métabolisme des organismes vivants. Les zones où cette stratification est perturbée par la circulation sont passées en revue : upwellings équatorial et côtier, dôme thermique. L'impact des divers processus physiques (advections horizontale et verticale, mélange turbulent vertical) sur l'enrichissement des couches superficielles est analysé. L'aspect saisonnier des processus d'enrichissement dans le Golfe de Guinée est démontré : la zone équatoriale et les bordures continentales sont enrichies superficiellement en nitrate pendant l'été boréal. La saison haute des dômes thermiques varie avec l'hémisphère : février pour le Dôme d'Angola et août pour le Dôme de Guinée. Les différences de vitesse de régénération du phosphate, du nitrate et du silicate sont mises en évidence par la comparaison des profils verticaux. L'originalité du silicate et son emploi possible comme traceur hydrologique sont soulignés. Une interprétation biologique des distributions verticales de nitrite et d'ammonium est proposée.*

**Mots-clés :** Nitrate — Nitrite — Ammonium — Phosphate — Silicate — Atlantique tropical.

ABSTRACT

NUTRIENTS ( $\text{NO}_3$ - $\text{NO}_2$ - $\text{NH}_4$ - $\text{PO}_4$ - $\text{SiO}_3$ ) IN THE ORIENTAL TROPICAL ATLANTIC WATERS

*The vertical distribution of nutrients in the Guinea Gulf is at first sight consistent with the equilibrium consumption-regeneration. The surface mixed layer in tropical areas, where the primary production cycle is unceasing during the whole year, is most of the time completely exhausted of nitrate, nitrite and ammonium and very impoverished in phosphate and silicate. In the thermocline layer, where the lack of light impedes the incorporation of these elements in the phytoplankton cells, the regeneration is predominant and the nutrients have their concentrations which increase with the depth. Nevertheless there are some areas where that distribution is disrupted: in equatorial zone and along some coasts (Congo-Gabon and Ivory Coast), a seasonal upwelling brings to the surface some water cold and enriched in nutrients. In some other places, the layers rich in nutrients are nearer the sea surface without to reach it: it is the case of the thermal domes (Angola in the southern hemisphere and Guinea in the northern one).*

*The strong vertical stability happened in the tropical regions restricts the vertical eddy diffusion of nutrients and the replenishment of their supply in the surface water. At the Equator however, the high vertical gradient of velocity set up between the surface Equatorial Current and the Equatorial Undercurrent increases sufficiently the vertical mixing to enrich the upper layers. The zonal advection plays a roll in the superficial enrichment at the Equator and south of the Equator (about 15° S) in the western branch of the Benguela Current. Beneath the surface, the Equatorial*

(1) Centre O.R.S.T.O.M., B.P. 1386, Dakar, Sénégal.

*Undercurrent consisted of waters issued from the oligotrophic regions of the southern and northern tropical anticyclones is poor in nutrients, whereas south of the Equator, between 5 and 15° S, the waters which flowed in depth along the Angola Coast, well known for the high biological productivity of the surface layers, accumulated a lot of regenerated elements.*

*The physical processes of enrichment of the surface layer are limited during the year: it is in northern summer (June to September), during the cold season, that one observes the highest concentrations of nutrients in the equatorial zone and along the eastern and northern coasts of the Guinea Gulf. The thermal domes, generated by the cyclonic circulation, are also a seasonal phenomenon: the Guinea Dome, with a sharp nitracline near the surface, is set up in northern summer (August) and the Angola one in southern summer (February).*

*The vertical distributions of nitrate, phosphate and silicate are on the whole very like, but one notices some differences arising from the different rates of regeneration of the nutrients elements. The phosphate concentration increases nearer the surface than the nitrate one, because it is firstly regenerated. The increase of silicate in the thermocline is low because the dissolution of the silicon from the frustules of diatoms is a slow process in sea water. The originality of the silicate distribution based on the inverse silicic acid-salinity relationship is used to identify the less saline water masses. The depth of disparition of nitrite in the subsuperficial layers is interpreted as the lower limit of the primary production and the usual deficiency of ammonium as the indication of a fast cycling of this nutrient in the euphotic layer.*

KEY WORDS : Nitrate — Nitrite — Ammonia — Phosphate — Silicate — Tropical Atlantic.

## 1. INTRODUCTION : GÉNÉRALITÉS SUR LA DISTRIBUTION DES SELS NUTRITIFS

Les sels ou éléments nutritifs sont de par leur fonction des constituants dissous de l'eau de mer impliqués dans le métabolisme des organismes vivants. Bien que d'après cette définition un grand nombre d'éléments biologiquement actifs, constituants majeurs ou éléments traces, puissent rentrer dans cette catégorie, le terme est traditionnellement réservé aux composés minéraux combinés de l'azote (nitrate, nitrite, ammonium), du phosphore (phosphate) et du silicium (silicate) (SPENCER, 1975) et nous nous limiterons à ceux-ci.

Il est donc logique que la distribution des sels nutritifs soit affectée par l'action des organismes vivants. L'échange des éléments nutritifs entre l'eau de mer et la biomasse est un processus cyclique, composé de deux phases : la photosynthèse et la régénération. Les sels nutritifs sont prélevés des couches éclairées de l'océan durant la phase photosynthétique par les producteurs primaires. Ils sont redistribués dans la colonne d'eau de mer au stade ultime de la phase de régénération comme produits d'excrétion des producteurs primaires et secondaires ou de décomposition des déchets organiques sous l'action des micro-organismes. Mais les sels nutritifs au même titre que les autres constituants dissous dans l'eau de mer sont transportés de place en place par l'advection horizontale ou verticale, ou échangés d'une masse d'eau à une autre par la diffusion turbulente.

Les processus primaires qui influencent les concentrations de sels nutritifs sont les processus géochimiques qui contrôlent l'addition de ces éléments

dans la mer, leur dispersion et leur enlèvement. Les produits d'altération des roches et des matériaux organiques, avec les rejets de déchets, sont les principales sources d'éléments nutritifs dans la mer, où ils arrivent avec les eaux de ruissellement. Le transfert depuis l'atmosphère constitue une contribution possible, soit par prélèvement direct de gaz par la mer, soit par addition d'eau de pluie et par dépôt de particules solides. Leur retrait de la solution d'eau de mer implique la formation d'une phase solide et la sédimentation de matière. De plus la perte d'éléments par le transport d'aérosols dans l'atmosphère est également possible.

A ces processus physiques viennent s'ajouter des mécanismes biologiques internes à l'océan d'addition, de suppression et de transport : ce sont l'incorporation d'azote, phosphore et silicium par les algues unicellulaires du phytoplancton, l'excrétion par les herbivores et la régénération des éléments sous leur forme minérale stable par l'action des bactéries. Certains organismes phytoplanctoniques peuvent dans certaines circonstances assimiler ces éléments à l'obscurité, mais l'incorporation finale dans les cellules végétales est tributaire de la photosynthèse. C'est pourquoi la disparition des sels nutritifs de la solution d'eau de mer par l'activité biologique est limitée aux couches supérieures bien éclairées de l'océan. L'incorporation des éléments nutritifs dans les cellules et les structures extracellulaires des organismes vivants est généralement un processus réversible, ces éléments retournant en solution sous leur forme chimique originale. Mais ils peuvent parfois, tels ceux d'azote, être libérés sous une forme chimique différente, ou bien encore être perdus pour les couches supérieures

par sédimentation des déchets organiques et même pour les couches profondes par dépôt ultime sur le fond des océans.

La disparition de phosphate et d'azote minéral combiné dans les couches supérieures de l'océan avec la croissance du phytoplancton est un phénomène bien connu. Si les populations phytoplanctoniques comptent des diatomées et des silicoflagellés, il y aura disparition de silicate également. La quantité disparue et la vitesse de disparition dépendent des facteurs qui régulent la croissance du phytoplancton. Dans la couche homogène de l'océan bien mélangée, l'épuisement en sels nutritifs est réparti uniformément sur toute la colonne d'eau, même si la photosynthèse est limitée à la partie supérieure, car le mélange vertical disperse ses effets à travers toute la colonne d'eau. Mais si une stratification thermique prend place, la lumière étant généralement insuffisante dans la thermocline pour soutenir le processus photosynthétique, l'épuisement en sels nutritifs sera limité à la couche au-dessus de la thermocline. Dans les zones de l'océan où existe une thermocline permanente, les zones tropicales par exemple, des concentrations très basses de sels nutritifs sont rencontrées toute l'année dans la couche homogène. Une petite proportion seulement des cellules phytoplanctoniques qui poussent dans les couches supérieures de la mer vieillissent et tombent dans l'eau profonde, où l'action bactérienne conduira à la régénération de l'azote et du phosphore. Le gros des cellules est consommé par les herbivores et une partie de l'azote et du phosphore ingérés est excrétée soit en solution soit sous forme de pelotes fécales dans la couche euphotique. Les produits solubles sont disponibles pour de nouvelles poussées phytoplanctoniques et un état d'équilibre s'établira pour maintenir des faibles concentrations d'éléments nutritifs. Mais une proportion des éléments ingérés par les herbivores sera libérée comme produits d'excrétion par des animaux d'un niveau supérieur de la chaîne alimentaire, qui peuvent avoir migré en dessous de la couche euphotique : ces produits rejoindront les déchets qui ont sédimenté des couches supérieures et ensemble ils contribueront, après leur minéralisation, au transport de ces éléments vers le bas de la colonne d'eau. Ces processus contribuent à l'augmentation bien connue des concentrations de sels nutritifs avec la profondeur.

Le renouvellement du stock de sels nutritifs dans l'eau de surface dépend de l'action des processus physiques. Aux latitudes moyennes, le refroidissement saisonnier détruit la stratification thermique et permet l'homogénéisation par le vent de toute la colonne d'eau et l'apport en surface des sels nutritifs régénérés. Mais il est des régions océaniques où la thermocline persiste toute l'année et où il n'y a

pas de renverse du flux de sels nutritifs. Dans ces régions, la zone intertropicale par exemple, le renouvellement des sels nutritifs ne peut se faire que par advection latérale. Néanmoins dans certaines zones, plus limitées, la remontée d'eau profonde sous l'effet de l'upwelling (le long des marges continentales et à l'équateur dans des conditions météorologiques bien précises) peut inverser le transport vertical des éléments nutritifs.

Les taux d'accumulations d'azote, phosphore et silicium dans l'eau profonde sont contrôlés par la productivité biologique des couches de surface, par les vitesses de régénérations des différents éléments et par le mélange vertical turbulent et les mouvements advectifs latéraux qui dispersent les sels nutritifs accumulés. Des différences de vitesse de régénérations affectent les concentrations relatives de ces éléments dans les diverses masses d'eau. Des différences dans les modalités de circulation de l'eau profonde occasionnent des différences caractéristiques dans la distribution des sels nutritifs qui se retrouvent généralement d'un sel à l'autre.

A la lumière de ces principes généraux, nous examinerons successivement les distributions des différents sels nutritifs dans le Golfe de Guinée, région orientale de l'Atlantique intertropical. Les données qui servent de base à cette description ont été recueillies au cours des différentes campagnes du N.O. CAPRICORNE menées par les océanographes de l'O.R.S.T.O.M. basés au Centre de Recherches Océanographiques d'Abidjan (Côte d'Ivoire) durant les années 1970 et de quelques campagnes du N.O. NIZERY du Centre O.R.S.T.O.M. de Pointe-Noire (République Populaire du Congo) (fig. 1). Ces campagnes s'attachant à l'étude de la productivité de la région, les observations sont cantonnées dans les 500 premiers mètres et plus particulièrement dans la tranche d'eau 0-150 mètres, où se fait le mieux sentir l'effet des variations saisonnières des facteurs physiques et biologiques.

## 2. AZOTE

### 2.1. Aspects de la chimie de l'azote dans l'eau de mer : diverses formes d'azote et méthodes de dosage

La forme la plus abondante d'azote dans l'eau de mer est l'azote élémentaire gazeux (plus de 350 mmol  $N_2 \cdot m^{-3}$ ). L'eau de mer contient aussi, à des concentrations beaucoup plus faibles (au maximum 15 fois moins), une large gamme de composés azotés minéraux et organiques où le degré d'oxydation de l'azote varie de -3 à +5.

Bien qu'il ait été démontré (DUGDALE *et al.*, 1961) que l'azote gazeux pouvait être fixé à la lumière

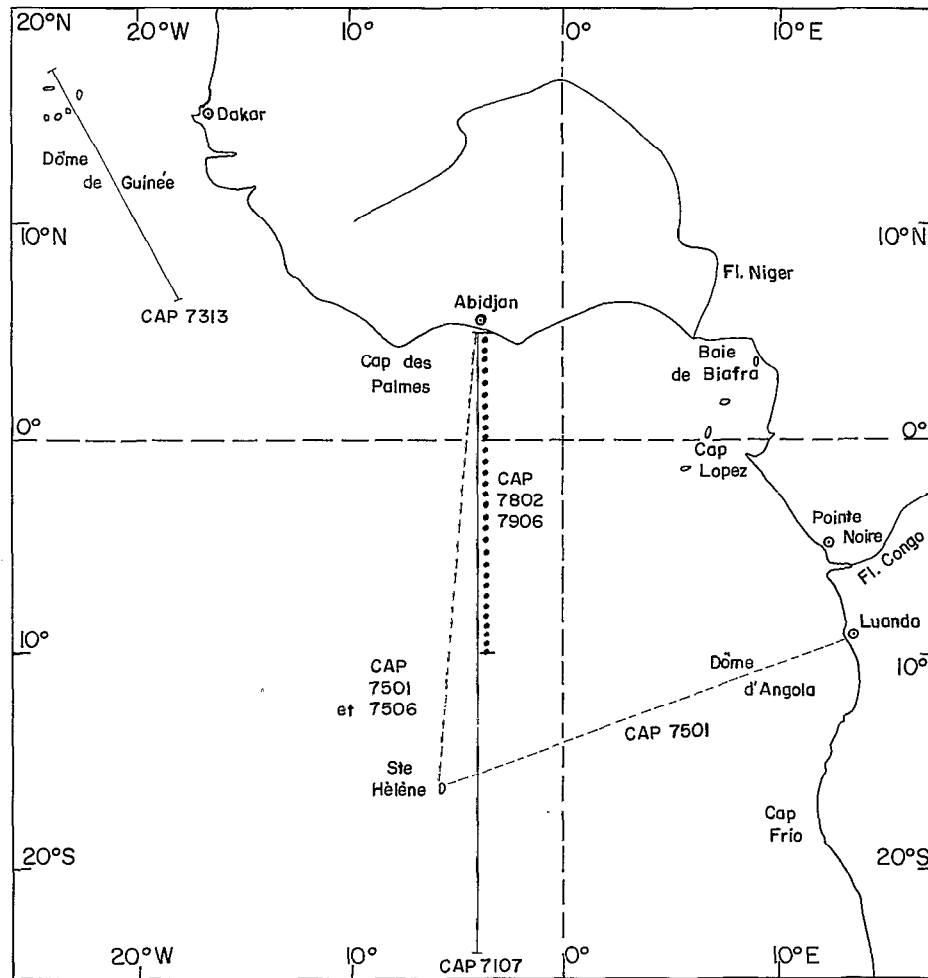


FIG. 1. — Situation des campagnes d'observations dans le Golfe de Guinée  
 Localisation of the observations cruises in the Gulf of Guinea

par certaines algues bleues (*Trichodesmium* par exemple) cette voie d'assimilation d'azote minéral reste insignifiante au sein de l'océan. BENSON et PARKER (1961) ont montré que dans l'Atlantique nord et sud le rapport azote/argon dissous restait dans les limites de 1 % de celui attendu de la dissolution des gaz atmosphériques. Dans ces conditions l'azote élémentaire se comporte comme un élément conservatif. Les petits écarts à la saturation relevés çà et là sont dus à des processus physiques (OUDOT, 1982).

Le nitrate est la forme thermodynamiquement stable de l'azote minéral combiné dans l'eau de mer bien oxygénée. Les variations de concentrations résultent principalement de l'activité biologique, mais la photoréduction du nitrate au voisinage immédiat de la surface (SPENCER, 1975) et la présence de nitrate dans l'eau de pluie océanique (VACCARO,

1965) ne peuvent être complètement ignorées. Le dosage du nitrate dans l'eau de mer, depuis l'introduction de réducteurs au cadmium, est une opération sûre et reproductible. Nous avons pour notre part automatisé sur Auto-Analyseur TECHNICON II la méthode de Wood *et al.* (1967).

Le nitrite est une forme d'azote présente généralement en faible quantité dans l'eau de mer. Dans ce composé l'azote est à un état d'oxydation intermédiaire entre l'ammonium et le nitrate, si bien que le nitrite apparaît comme une étape transitoire dans l'oxydation de l'ammonium aussi bien que dans la réduction du nitrate. Bien que la réduction photochimique signalée précédemment ne puisse être exclue, ces deux processus sont l'œuvre des agents biologiques principalement. Des méthodes précises de détermination de nitrite sont disponibles depuis de nombreuses années. Nous avons employé

la méthode classique de BENSCHNEIDER et ROBINSON (1952), automatisée sur Auto-Analyseur TECH-NICON II.

L'ammonium (la forme cationique est de loin l'espèce ionique dominante de l'azote minéral combiné à ce degré d'oxydation dans la mer, SPENCER, 1975) est resté pendant longtemps peu étudié, par manque de méthode de dosage convenable. Aujourd'hui la méthode au bleu d'indophénol est la plus couramment employée : nous avons utilisé pour nos mesures une méthode automatique (Auto-Analyseur TECHNICON II) dérivée de celle de GRASSHOFF et JOHANNSEN (1972) qui a recours au dichloroisocyanurate de sodium comme agent chlorant. Des trois formes d'azote minéral, l'ammonium est souvent assimilé préférentiellement par le phytoplancton. C'est également la première forme d'azote minéral régénérée, par le biais de l'excrétion zooplanctonique principalement. Le rôle de l'eau de pluie comme apport d'ammonium à la couche de surface océanique a été démontré par une corrélation positive entre la concentration d'ammonium dans l'eau de surface et l'eau de pluie accumulée les jours précédant la détermination d'azote ammoniacal (MENZEL et SPAETH *in* SPENCER, 1975). Cependant DUGDALE et GÖRING (1967) considèrent cet apport dans la couche euphotique

comme négligeable par rapport à la demande journalière du phytoplancton.

## 2.2. Variations spatiales d'azote

### 2.2.1. DISTRIBUTIONS DE NITRATE

La distribution verticale de nitrate le long du méridien 4° W (fig. 2) illustre la disparition de nitrate dans la couche de surface suivant le principe général de distribution des sels nutritifs. Toutefois il ressort à cette époque de l'année (novembre) deux bandes, l'une étroite à 2° S, l'autre plus large de 13 à 19° S, où la concentration de la couche superficielle n'est pas nulle. Ces deux zones plus riches sont le reflet des traits de la circulation générale dans la région : la divergence équatoriale accompagnée d'un upwelling légèrement au sud de l'équateur à cette longitude et la dérive de Benguela, prolongation du Courant de Benguela, froid et riche en sels nutritifs, qui incurve fortement sa trajectoire vers l'ouest au nord du Cap Frio (LEMASSON et RÉBERT, 1973 *a*). La couche de gradient vertical de nitrate, appelée nitracline par analogie avec la thermocline (VOITURIEZ et HERBLAND, 1977 *b*) est plus ou moins proche de la surface : elle n'est qu'à 20 mètres sous la

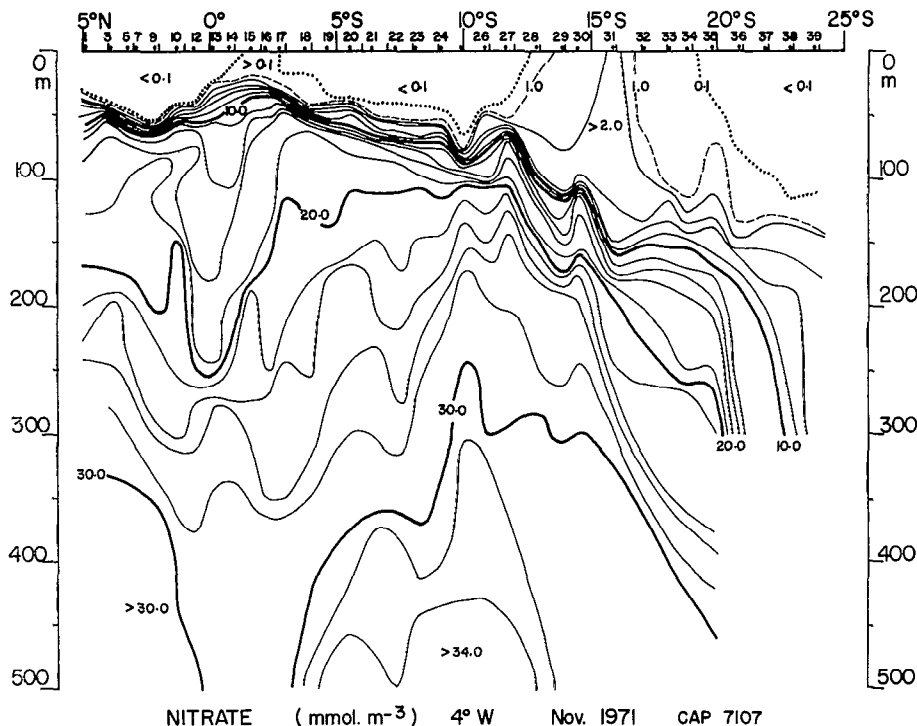


FIG. 2. — Distribution verticale de nitrate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) le long du méridien 4° W en novembre 1971 (CAPRICORNE 7107)  
Vertical distribution of nitrate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) along 4° W in November 1971 (CAPRICORNE 7107)

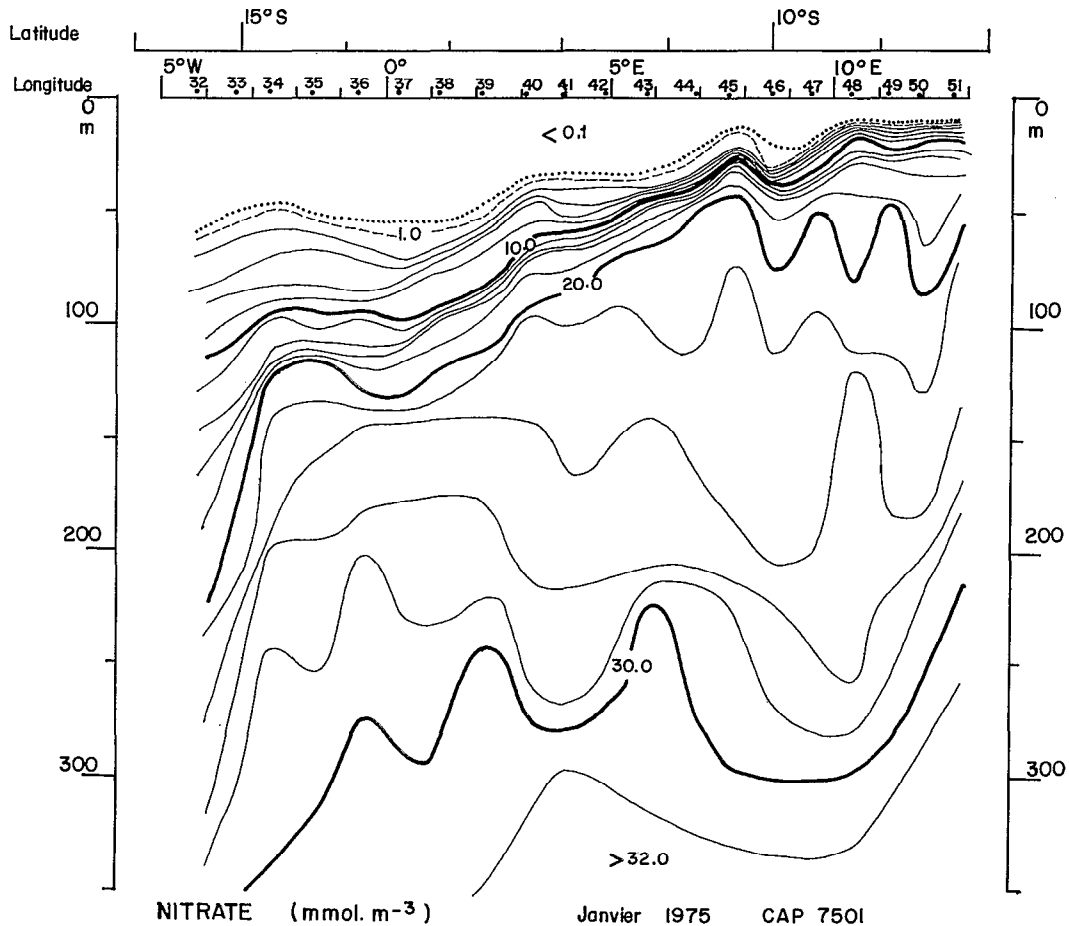


FIG. 3. — Distribution verticale de nitrate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) entre Sainte-Hélène et Luanda (Angola) en janvier 1975 (CAPRICORNE 7501)

*Vertical distribution of nitrate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) between Saint-Helena Island and Luanda (Angola) in January 1975 (CAPRICORNE 7501)*

surface au voisinage de l'équateur et à plus de 100 mètres au sud de  $18^{\circ}\text{S}$ . La couche épuisée en nitrate est encore moins épaisse dans la partie orientale du Golfe de Guinée (fig. 3) : dans la région du Dôme d'Angola ( $10^{\circ}\text{S}$ ,  $9^{\circ}\text{E}$  : GALLARDO *et al.*, 1974) elle n'a que 10 mètres d'épaisseur. Cette distribution (couche de surface épuisée en nitrate et nitracline très près de la surface) est un trait de structure caractéristique des dômes et se retrouve dans l'Atlantique nord au large de la Guinée Bissau dans le Dôme de Guinée (fig. 4). VOITURIEZ et DANDONNEAU (1974) ont analysé les relations existant entre la structure thermique, la production primaire et la régénération des sels nutritifs dans ce dôme : cette régénération accélérée avec la production intensive dans la couche euphotique est illustrée ici par le maximum subsuperficiel de nitrate (fig. 4 : concentrations supérieures à  $24,0 \text{ mmol NO}_3\text{.m}^{-3}$ ).

A l'équateur (fig. 2), l'éclatement de la nitracline

(entre 60 et 250 mètres) traduit l'écoulement vers l'est des eaux salées et pauvres en sels nutritifs du Sous Courant Équatorial (Courant de Lomonosov). Au sud de l'équateur en profondeur, les eaux riches en nitrate (concentrations supérieures à  $30,0 \text{ mmol.m}^{-3}$  en dessous de 300 mètres) sont dérivées des eaux côtières angolaises comme le montre la continuité avec celles de la figure 3, à la même profondeur et plus à l'est. Ces eaux sont le siège d'une régénération intensive à partir de la matière organique sédimentée et préalablement synthétisée dans la couche euphotique, réputée productive sur la bordure orientale des océans. Au sud de  $20^{\circ}\text{S}$  (fig. 2), toute la colonne d'eau de la surface jusqu'à 300 mètres s'appauvrit considérablement en nitrate : on rentre dans les eaux oligotrophes de la convergence subtropicale (LEMAS-SON et RÉBERT, 1973 a).

La distribution horizontale du nitrate à la surface

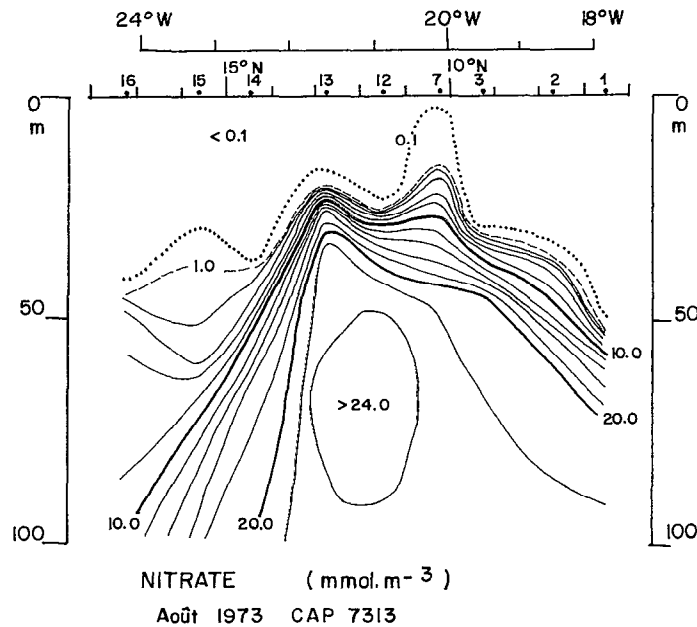


FIG. 4. — Distribution verticale de nitrate (mmol. m<sup>-3</sup>) à travers le Dôme de Guinée en août 1973 (CAPRICORNE 7313)  
*Vertical distribution of nitrate (mmol. m<sup>-3</sup>) crossing the Guinea Dome in August 1973 (CAPRICORNE 7313)*

dans le Golfe de Guinée (fig. 5) révèle la continuité zonale de l'enrichissement équatorial. Cette ceinture équatoriale de nitrate rejoint à l'est une frange méridienne d'eau considérablement enrichie par l'upwelling côtier congo-gabonais (WAUTHY, 1977), suggérant fortement un rôle possible de l'advection horizontale sur l'enrichissement équatorial. L'upwelling côtier est parmi les processus physiques un de ceux qui conduit au plus fort enrichissement de la couche superficielle en sels nutritifs, et des concentrations de nitrate supérieures à 10,0 mmol.m<sup>-3</sup> en surface ne sont pas rares le long de la côte (fig. 6 : entre 2 et 4° S). En face du Congo, il ne faut cependant oublier l'influence possible des eaux continentales à travers le débit important du fleuve Congo : la « langue » de nitrate supérieur à 10,0 mmol.m<sup>-3</sup> devant Pointe-Noire (fig. 6) est une langue d'eau dessalée ( $S < 30.10^{-3}$ ) et froide ( $T < 22$  °C), mélange d'eau froide remontée par upwelling et d'eau continentale dessalée par le fleuve Congo (WAUTHY, 1977). Pour atteindre une concentration aussi élevée de nitrate dans l'eau de mélange (plus de 15,0 mmol. m<sup>-3</sup>), on est bien obligé d'admettre qu'il y a apport de nitrate avec l'eau continentale ; d'ailleurs sur la radiale en face de Pointe-Noire (fig. 6), la concentration en nitrate augmente au fur et à mesure que la salinité diminue. On peut donc considérer qu'il y a deux sources distinctes d'enrichissement superficiel en nitrate sur la bordure orientale du

Golfe de Guinée, ce qui permettrait d'expliquer la séparation de la zone d'enrichissement équatorial en deux veines de part et d'autre de 4° S lorsqu'on s'écarte de la côte (fig. 6), séparation qu'on retrouve en 1978 (à 1° E) et en 1979 (à 6° E) (fig. 5). Si dans la partie orientale du Golfe de Guinée, jusqu'à 4° W, l'enrichissement en nitrate reste cantonné au sud de l'Équateur, à 9° W (fig. 5 en haut) l'enrichissement déborde au nord de l'Équateur. L'advection zonale liée aux alizés de sud-est n'est pas seule responsable de l'enrichissement superficiel en nitrate. En effet en août 1978 (en pleine période d'upwelling équatorial) comme en juin-juillet 1979 (au début de la période d'upwelling), les concentrations maximales de nitrate relevées le long du méridien 4° W sont plus élevées que celles du méridien 1° E. D'autre part, si on peut admettre que le long du méridien 9° W, l'enrichissement à 2-3° S puisse provenir par advection de celui observé le long de 4° W, une autre source d'enrichissement en nitrate apparaît vraisemblablement entre 0° et 1° N, qui est la zone la plus froide relevée le long de ce méridien (VOITURIEZ, 1980). Ces poussées successives de l'enrichissement superficiel en nitrate, au fur et à mesure du déplacement vers l'ouest, sont dues à des remontées d'eau subsuperficielle riche en sels nutritifs sous l'effet de la divergence équatoriale. Cette divergence établie bien au sud de l'équateur dans les parties centrale et orientale du Golfe de

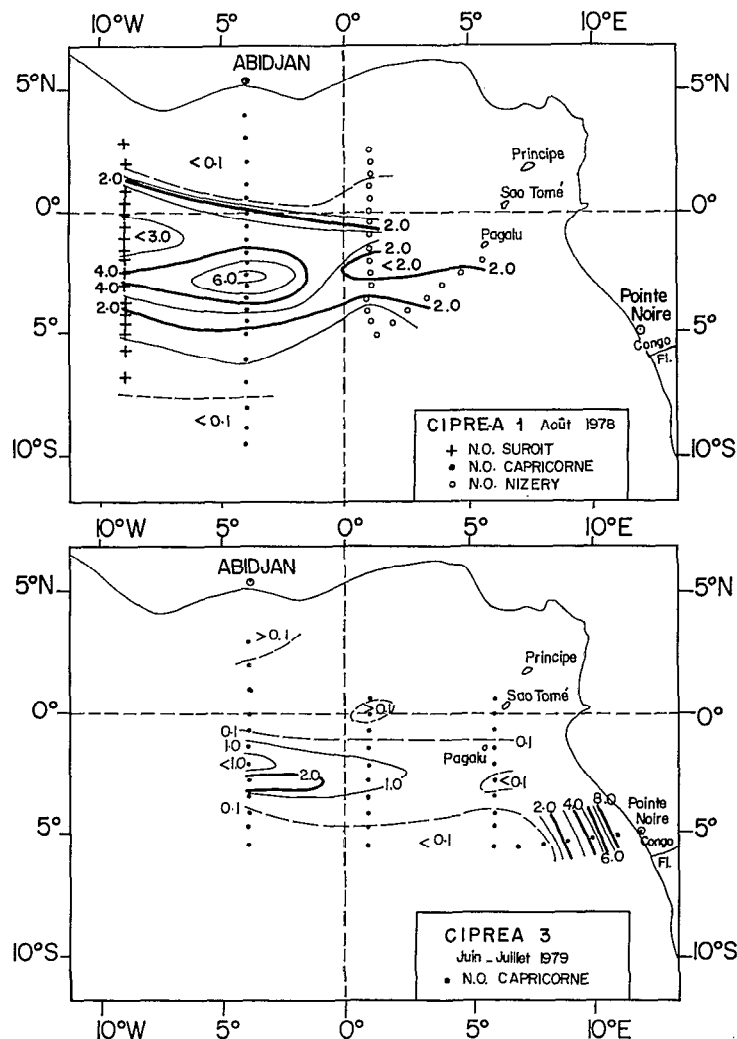


FIG. 5. — Distribution de nitrate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) à la surface de la mer en août 1978 (CIPREA 1) et en juin-juillet 1979 (CIPREA 3) dans le Golfe de Guinée

*Distribution of nitrate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) at the sea surface in August 1978 (CIPREA 1 cruise) and in June-July 1979 (CIPREA 3 cruise) in the Gulf of Guinea*

Guinée, où le vent a une forte composante du sud, se rapproche de l'équateur dans la partie occidentale avec le fléchissement de la tension méridienne du vent (VOITURIEZ, 1980).

Au nord du Golfe de Guinée également, entre le Cap des Palmes et Abidjan, un upwelling côtier marque de son empreinte les eaux du plateau continental ivoirien en été (fig. 7). Compte tenu de la morphologie de la côte et de la direction des vents dominants (vents de sud-ouest), le point d'enrichissement maximum en nitrate à la surface est toujours relevé immédiatement à l'est du Cap des Palmes, entre Tabou et Sassandra, région la plus favorable à une forte remontée d'eau profonde (MORLIÈRE et

RÉBERT, 1972). L'accroissement de la concentration de nitrate en surface près de la côte (sur fond de 60 mètres) est soudain et localisé : plus de  $8,0 \text{ mmol. m}^{-3}$  en face de San-Pédro contre zéro devant le Cap des Palmes et Abidjan.

### 2.2.2. DISTRIBUTIONS DE NITRITE

La distribution verticale de nitrite le long du méridien  $4^{\circ} \text{ W}$  (fig. 8) révèle que le nitrite est généralement absent de la couche de surface et que la concentration maximum se situe en subsurface, vers 50 mètres en zone équatoriale et plus profondément dans la partie sud. En profondeur, la



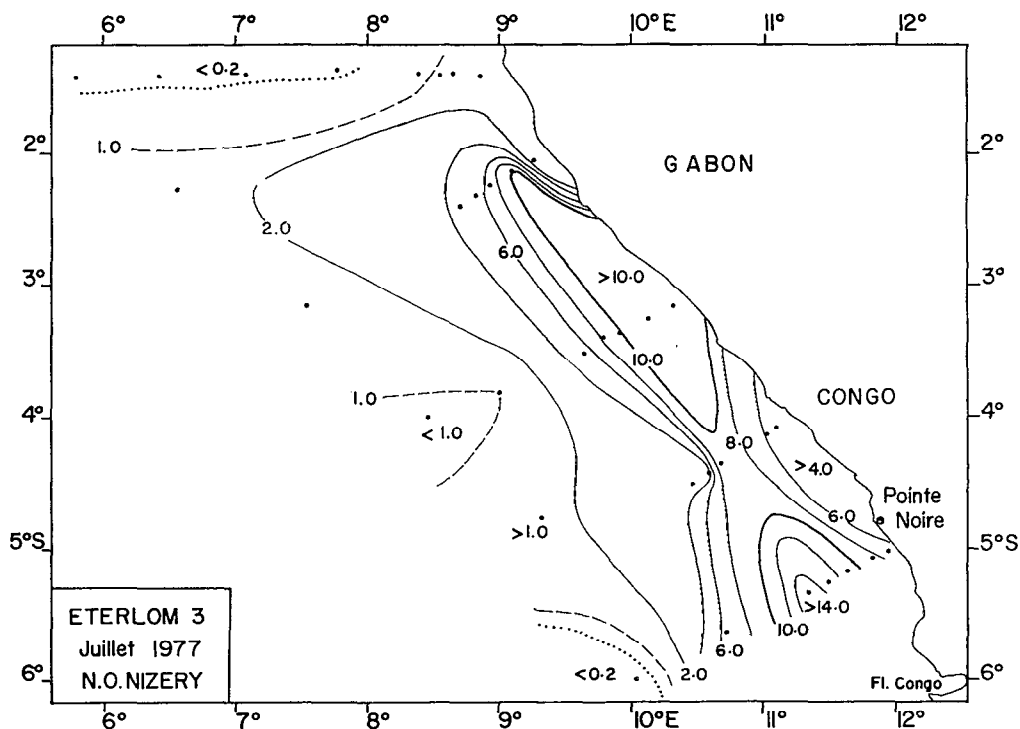


Fig. 6. — Distribution de nitrate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) à la surface de la mer en juillet 1977 (N.O. NIZERY) dans la partie orientale du Golfe de Guinée

*Distribution of nitrate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) at the sea surface in July 1977 (R.V. NIZERY) in the eastern part of the Gulf of Guinea*

concentration de nitrite est négligeable à partir de 100 mètres entre  $5^{\circ}\text{N}$  et  $12^{\circ}\text{S}$  et à partir de 150 mètres au-delà de  $12^{\circ}\text{S}$ . On peut voir en outre que si la concentration maximale de nitrite varie considérablement avec la latitude, elle reste généralement inférieure à  $0,5 \text{ mmol. m}^{-3}$  et dépasse rarement  $1,0 \text{ mmol. m}^{-3}$ .

La comparaison de la distribution méridienne de nitrite (fig. 8) avec celle de nitrate (fig. 2) fait ressortir deux points importants de la liaison nitrite-nitrate. En surface, le nitrite n'apparaît (à  $2^{\circ}\text{S}$  et  $15^{\circ}\text{S}$ ) que lorsque le nitrate est présent et en subsurface le maximum de nitrite est toujours situé au début du gradient vertical de nitrate, c'est-à-dire au sommet de la nitracline. VOITURIEZ et HERBLAND (1977 b) ont clairement démontré l'association étroite entre ce maximum de nitrite et la nitracline dans diverses situations hydrologiques typiques (couche homogène épaisse — dôme — upwelling équatorial) et tirent argument de cette relation pour attacher au maximum de nitrite une signification écologique. Ces auteurs attribuent l'origine de ce maximum, appelé maximum primaire, à la réduction phytoplanctonique de nitrate car parmi les mécanismes de contrôle de la

nitracline la production primaire est un facteur important. L'horizon de nitrite définit la couche profonde de la zone euphotique où la lumière devient le facteur limitant de la production primaire. La profondeur de disparition de nitrite coïncide avec l'arrêt de la consommation de nitrate par le phytoplancton et l'isoplethe  $0,1 \text{ mmol. NO}_2 \cdot \text{m}^{-3}$  représente une bonne définition de la profondeur limite de la couche productive (VOITURIEZ et HERBLAND, 1977 b).

Mais il arrive parfois que la distribution verticale de nitrite soit plus complexe avec superposition de deux maximums. Dans le Dôme de Guinée, VOITURIEZ et DANDONNEAU (1974) ont signalé l'existence d'un double maximum dont le plus profond est associé à un minimum subsuperficiel d'oxygène (fig. 9). Le maximum profond, appelé secondaire, est nettement séparé du maximum primaire à la nitracline et la concentration de nitrite peut être parfois plus élevée dans le maximum secondaire que dans le maximum primaire. Après avoir réfuté les hypothèses de la réduction du nitrate par le phytoplancton et les bactéries, VOITURIEZ et HERBLAND (1977 a) retiennent la nitrification comme le processus le plus probable de formation du maximum secondaire de nitrite dans le Dôme de

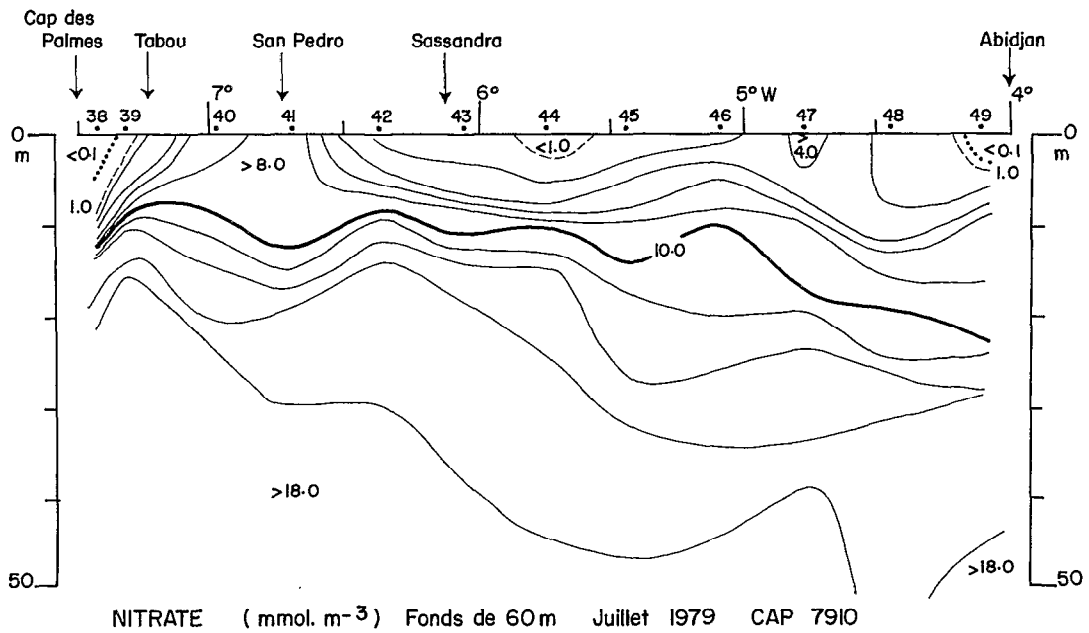


FIG. 7. — Distribution verticale de nitrate (mmol. m<sup>-3</sup>) le long de la Côte d'Ivoire (du Cap des Palmes à Abidjan) en juillet 1979 (CAPRICORNE 7910)

Vertical distribution of nitrate (mmol. m<sup>-3</sup>) along the Ivory Coast (from Palms Cape to Abidjan), over 60 meters bottom, in July 1979 (CAPRICORNE 7910)

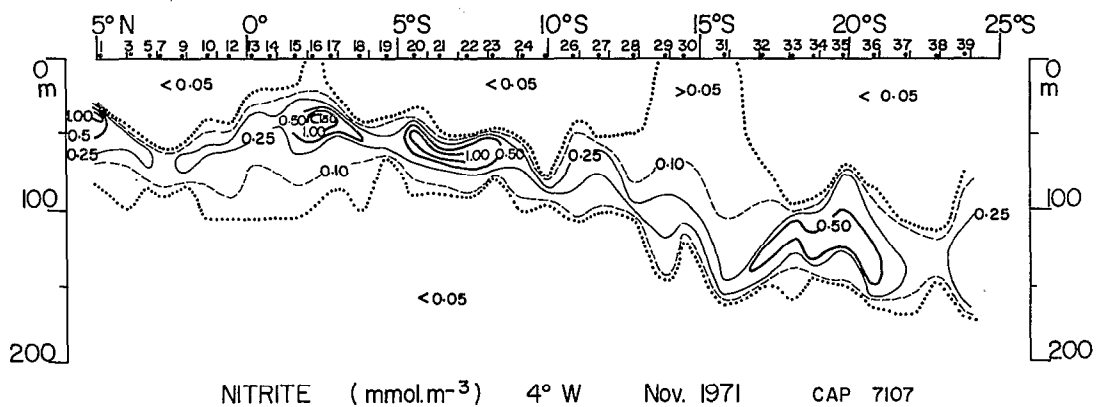


FIG. 8. — Distribution verticale de nitrite (mmol. m<sup>-3</sup>) le long du méridien 4° W en novembre 1971 (CAPRICORNE 7107)  
Vertical distribution of nitrite (mmol. m<sup>-3</sup>) along 4° W in November 1971 (CAPRICORNE 7107)

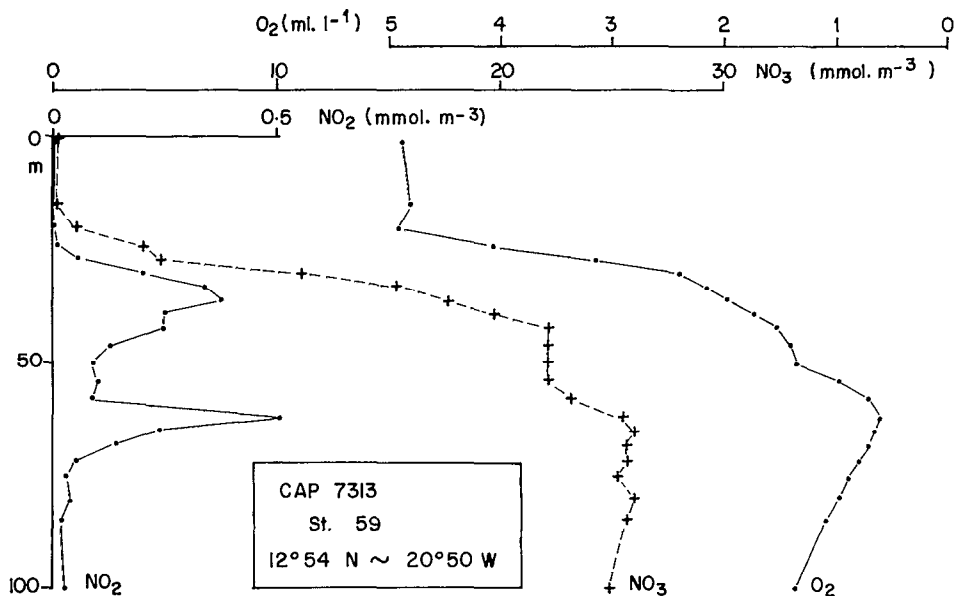


FIG. 9. — Distribution verticale de nitrite, nitrate et oxygène à une station au centre du Dôme de Guinée en août 1973 (CAPRICORNE 7313)

Vertical distribution of nitrite, nitrate and oxygen in center of the Guinea Dome in August 1973 (CAPRICORNE 7313)

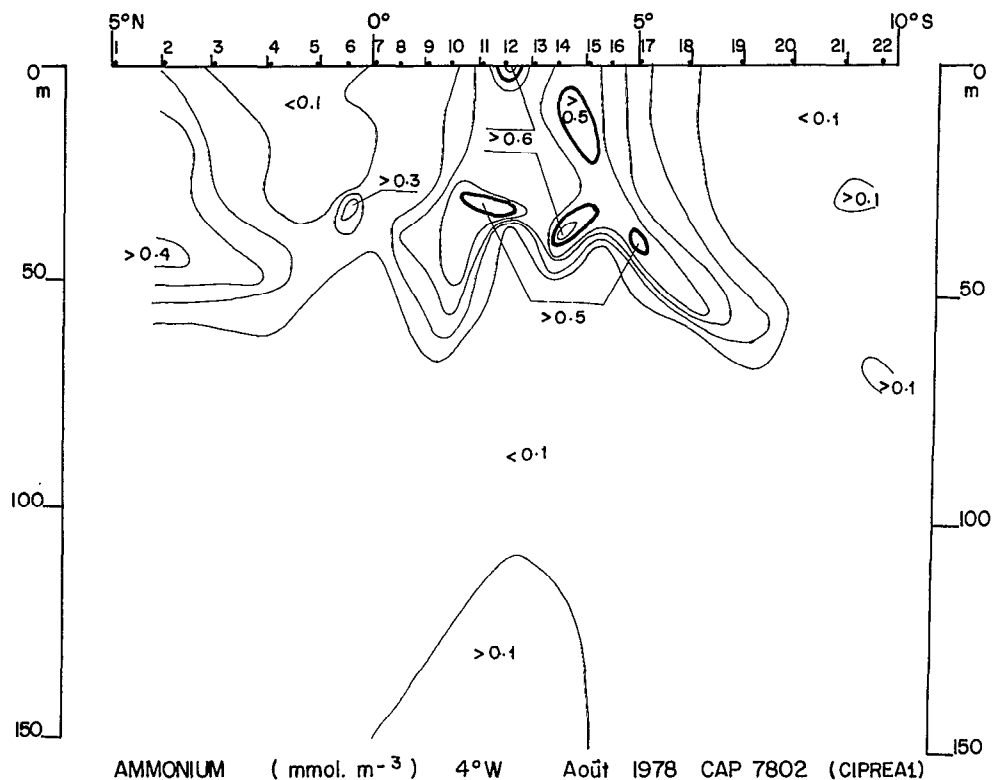


FIG. 10. — Distribution verticale d'ammonium ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) le long du méridien  $4^{\circ}$  W en août 1978 (CAPRICORNE 7802)

Vertical distribution of ammonium ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) along  $4^{\circ}$  W in August 1978 (CAPRICORNE 7802)

Guinée. On peut faire remarquer à l'appui de cette explication la position du maximum secondaire à la limite supérieure du maximum subsuperficiel de nitrate, signe d'une régénération intensive des sels nutritifs. Cette situation du maximum profond rappelle celle décrite pour des importantes couches d'accumulation de nitrite rencontrées dans le Pacifique équatorial sud-ouest (OUDOT, 1978).

### 2.2.3. DISTRIBUTION D'AMMONIUM

La distribution verticale d'ammonium le long du méridien 4° W, de 5° N à 10° S, lors de la première campagne CIPREA (août-septembre 1978), montre que la zone la plus riche est celle de la divergence équatoriale axée sur 2-3° S (fig. 10). Au voisinage de la côte (4° N), la colonne d'eau s'enrichit également en ammonium. Une telle distribution est à rapprocher de l'activité planctonique dont le taux est renforcé par le processus d'upwelling à cette époque, à l'équateur et le long de la côte. Contrairement à l'assertion de SPENCER (1975) pour qui l'ammonium est la forme dominante de l'azote minéral combiné dans l'eau de surface sous les tropiques, il est rare de trouver de l'ammonium en absence de nitrate.

La distribution verticale d'ammonium présente des similitudes avec celle de nitrite : la concentration maximale est rencontrée en subsurface et les couches profondes riches en nitrate sont dépourvues d'ammonium. Le maximum d'ammonium est situé habituellement juste au-dessus de celui de nitrite (fig. 11) : dès que le nitrite augmente avec la profondeur,

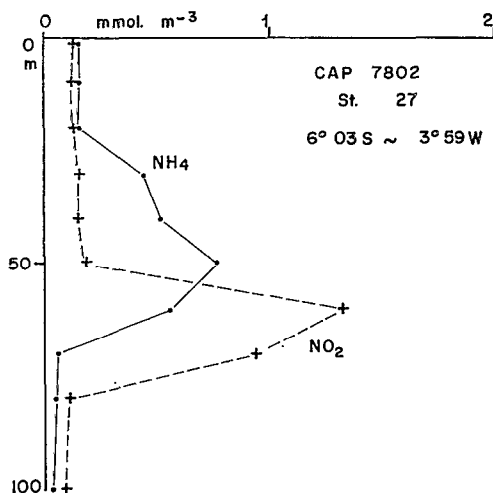


Fig. 11. — Distributions verticales comparées d'ammonium (mmol. m<sup>-3</sup>) et de nitrite (mmol. m<sup>-3</sup>)

Comparison of vertical distributions of ammonium (mmol. m<sup>-3</sup>) and nitrite (mmol. m<sup>-3</sup>)

la concentration d'ammonium diminue. VOITURIEZ et DANDONNEAU (1974) se réfèrent à la position du maximum d'ammonium au bas de la couche épuisée en nitrate pour illustrer et situer la régénération des sels nutritifs à ce niveau. D'après LE BORGNE (1977), en zone équatoriale plus de 80 % de l'excrétion zooplanctonique d'azote et de phosphore ont lieu dans la couche de production primaire. Il y a donc très peu de chance d'observer des accumulations importantes d'ammonium, ce sel étant immédiatement réutilisé par les producteurs primaires.

### 2.3. Variations temporelles

#### 2.3.1. VARIATIONS TEMPORELLES DE LA DISTRIBUTION DE NITRATE

En zone intertropicale, le cycle de production est continu tout au long de l'année (CUSHING, 1975) et les variations observées dans la distribution des sels nutritifs reflètent les modifications du régime de circulation des masses d'eau. VOITURIEZ et HERBLAND (1977 c) dans leur analyse des relations entre la production primaire et la structure hydrologique rappellent l'existence dans la région équatoriale du Golfe de Guinée de deux saisons : d'octobre à juin une saison chaude et de juin à septembre une saison froide qui correspond à l'apparition d'un upwelling équatorial. En saison chaude toute la région comprise entre Abidjan et Sainte-Hélène voit sa couche homogène totalement dépourvue de nitrate (fig. 12 en haut). L'épaisseur de la couche épuisée en nitrate varie avec la latitude et c'est à 3° S que le sommet de la nitracline est le plus proche de la surface. Cette remontée de la nitracline est une manifestation de la crête thermique à 3° S, qui est un trait permanent de la structure thermique dans l'Atlantique équatorial (VOITURIEZ et HERBLAND, 1977 c). En juillet, saison froide, la couche de surface entre 0° et 5° S s'est considérablement enrichie en nitrate (fig. 12 en bas) et l'axe d'enrichissement semble s'être rapproché de l'équateur. Pour VOITURIEZ et HERBLAND (1977 c) cet enrichissement correspond à un upwelling actif centré sur 0°30' S à la latitude du Sous-Courant Équatorial. Ils en concluent qu'il existe deux mécanismes d'enrichissement à l'équateur : la crête thermique permanente à 3° S et l'upwelling équatorial saisonnier (juillet-août). Mais les variations locales du vent étant insuffisantes pour expliquer l'apparition de l'upwelling équatorial en été (HISARD *et al.*, 1977), celle-ci serait liée à l'intensification des mélanges verticaux provoquée par l'augmentation du gradient vertical de vitesse horizontale qui s'établit entre le Courant Équatorial Sud de surface portant à l'ouest

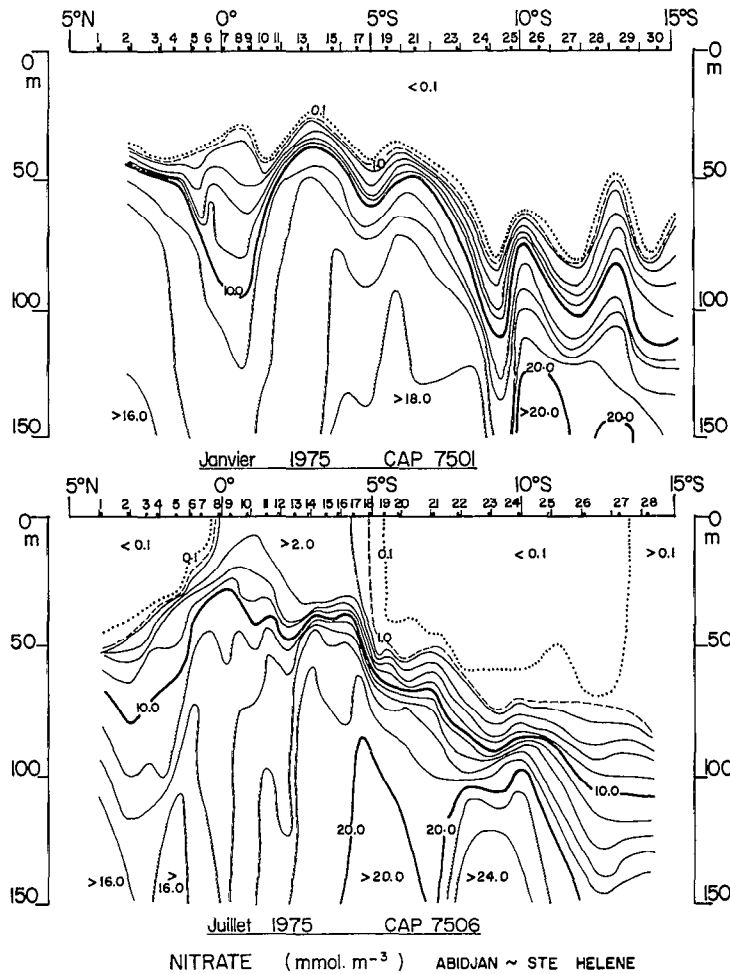


Fig. 12. — Distributions verticales de nitrate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) entre Abidjan et Sainte-Hélène en janvier 1975 (CAPRICORNE 7501) et en juillet 1975 (CAPRICORNE 7506)

Vertical distributions of nitrate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) between Abidjan and Saint Helena Island in January 1975 (CAPRICORNE 7501) and in July 1975 (CAPRICORNE 7506)

et le Sous Courant Équatorial portant à l'est. A l'appui de cette proposition, les auteurs font remarquer que d'après le schéma de circulation méridienne de CROMWELL (1953), la divergence des composantes méridiennes du courant de surface devrait situer l'upwelling plus loin au sud de l'équateur. VOITURIEZ et HERBLAND (1977 c) délimitent avec précision la remontée des eaux froides et riches en nitrate à la zone comprise entre  $0^{\circ}30' \text{ N}$  et  $1^{\circ}30' \text{ S}$  et expliquent la dissymétrie de répartition des eaux riches en surface par l'arrêt brutal des eaux remontées au contact du front thermohalin à  $0^{\circ}30' \text{ N}$  et leur transport vers le sud en absence de barrière hydrologique aussi nette qu'au nord de l'équateur. Dans une revue récente de l'upwelling dans l'Atlantique oriental, VOITURIEZ (1980) recon-

naît pourtant qu'il existe un bon accord entre les variations saisonnières de l'upwelling équatorial et les variations locales de la tension du vent et que le modèle qualitatif de Cromwell s'accommode de la position habituellement méridionale de la divergence équatoriale, généralement vers  $2\text{-}3^{\circ} \text{ S}$ . A ce sujet les dernières observations (campagnes CIPREA) situent bien l'axe d'enrichissement en nitrate nettement au sud de l'équateur (fig. 13). A  $15^{\circ} \text{ S}$  (fig. 12) l'enrichissement superficiel dans la dérive de Benguela disparaît pendant la saison chaude. En subsurface, le Sous Courant Équatorial, entre 30 et 150 mètres à l'équateur, véhicule de seaux plus riches en nitrate en juillet qu'en janvier, tandis que vers  $10^{\circ} \text{ S}$  l'enrichissement des couches profondes en dessous de 100 mètres en juillet pourrait traduire

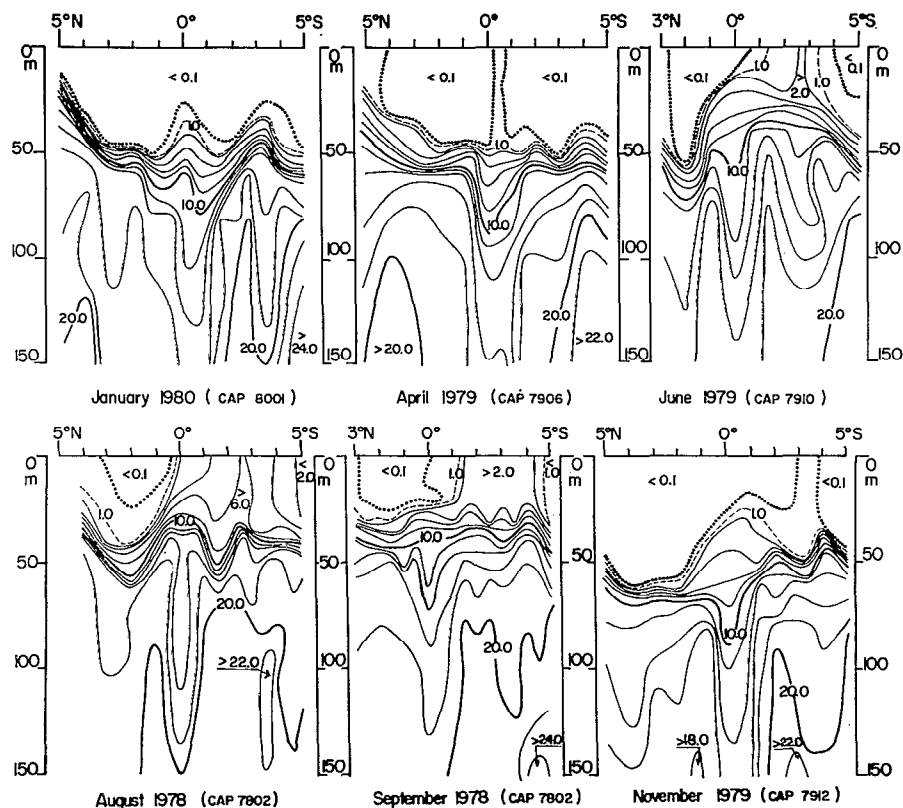


FIG. 13. — Distributions verticales de nitrate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) le long du méridien  $4^{\circ}$  W en six différents mois de l'année (N.O. CAPRICORNE)

*Vertical distributions of nitrate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) along  $4^{\circ}$  W in six different months of the year (R.V. CAPRICORNE)*

une régénération plus importante des sels nutritifs en cette saison.

VOITURIEZ et HERBLAND (1977 c) délimitent la saison chaude d'octobre à juin et la saison froide de juin à septembre, tandis que pour HISARD (1973) l'enrichissement est maximum de septembre à novembre. Les cinq campagnes CIPREA effectuées entre août 1978 et janvier 1980 le long du méridien  $4^{\circ}$  W permettent de préciser la durée de la période d'enrichissement équatorial et son extension méridienne (fig. 13). Si l'on admet comme critère d'enrichissement la concentration  $0,1 \text{ mmol. NO}_3 \cdot \text{m}^{-3}$ , il n'y a qu'en janvier où la zone équatoriale soit totalement dépourvue de nitrate en surface. Mais si l'on se réfère à une valeur plus significative, telle que  $1,0 \text{ mmol. m}^{-3}$ , on peut dire que l'enrichissement superficiel de la zone équatoriale dure seulement de juin à septembre et que l'enrichissement maximum se rencontre en août ( $6,0 \text{ mmol. NO}_3 \cdot \text{m}^{-3}$  en surface à  $2^{\circ}30' \text{ S}$ ). Cette période pourrait toutefois s'allonger jusqu'en octobre, si l'on en croit les observations lors d'une station de longue durée

à l'équateur en octobre 1979 (fig. 14). D'après la forme des isoplèthes de nitrate ( $1,0$  à  $10,0$  par exemple) on peut suivre figure 13 l'évolution au cours de l'année des deux mécanismes d'enrichissement proposés par VOITURIEZ et HERBLAND (1977 c) : le mélange vertical à la frontière du courant de surface et du Sous Courant Équatorial et la crête thermique qui se transforme en upwelling en été à  $3^{\circ}$  S. C'est en août que ces deux mécanismes sont les plus efficaces : la concentration de surface dépasse  $6,0 \text{ mmol. NO}_3 \cdot \text{m}^{-3}$  vers  $3^{\circ}$  S et l'isoplèthe  $10,0 \text{ mmol. m}^{-3}$  est la plus proche de la surface à l'équateur. C'est en avril que le sommet de la nitracline est le plus profond aussi bien dans la crête thermique qu'à l'équateur. Cependant tandis que l'upwelling proprement dit disparaît après septembre (ou après octobre à la rigueur) le dôme équatorial des isoplèthes de nitrate persiste jusqu'en novembre voire même jusqu'en janvier. Cette analyse temporelle tend à accréditer l'idée que le mélange vertical turbulent au sommet du Sous Courant Équatorial serait, par la durée de ses effets, le mécanisme prépondérant

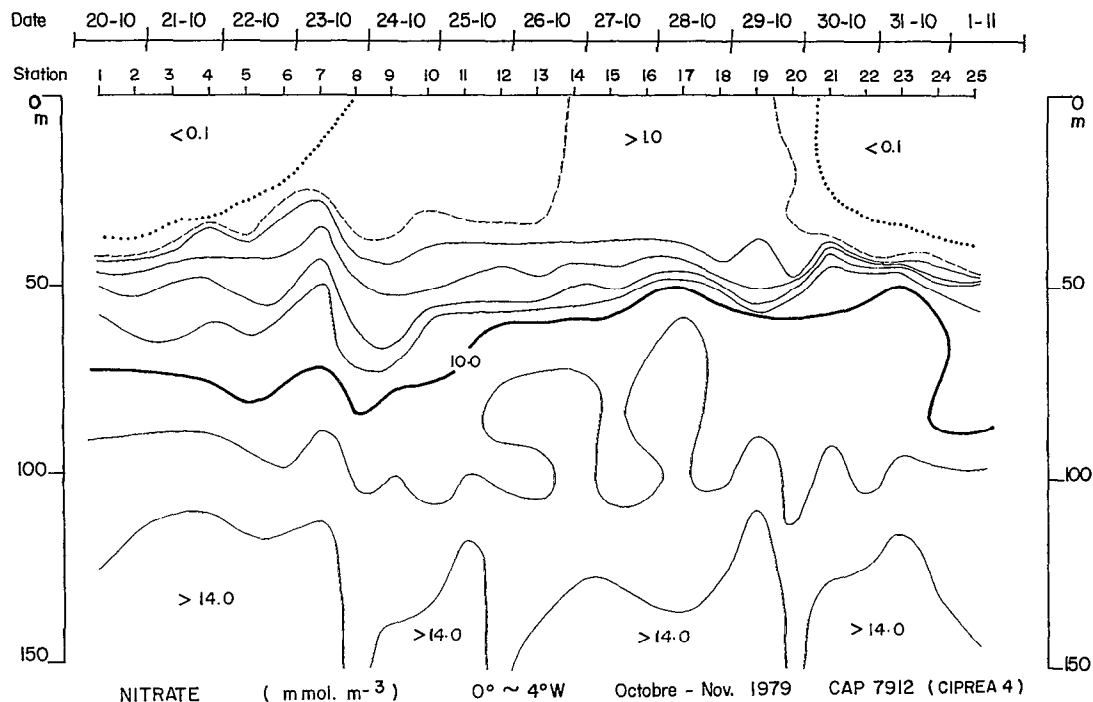


FIG. 14. — Variation temporelle de la distribution verticale de nitrate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) à l'équateur (à  $4^{\circ}$  W) en octobre-novembre 1979 (CAPRICORNE 7912)

Temporal variation of the vertical distribution of nitrate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) at the Equator (at  $4^{\circ}$  W) in October-November 1979 (CAPRICORNE 7912)

d'enrichissement de la zone équatoriale orientale, confirmant ainsi le rôle majeur joué par l'échange vertical turbulent démontré par KAISER et POSTEL (1979) à  $30^{\circ}$  W. Il ne faut toutefois pas oublier le rôle possible de l'advection horizontale sur l'enrichissement superficiel en nitrate à  $3^{\circ}$  S suggérée par HISARD (1973) et discutée précédemment (fig. 5), même si sa part exacte n'a pas été chiffrée avec précision jusqu'à ce jour. Ce rythme saisonnier n'est pas toujours respecté : il existe de temps à autre une année exceptionnelle où l'enrichissement estival à l'équateur n'apparaît pas. C'est le cas de l'année 1963, quand en août (campagne Équalant II) l'upwelling ne s'est pas manifesté, ou de l'année 1968 quand en juin (campagne Guinée I du N.O. JEAN-CHARCOT : HISARD, 1973) la teneur en nitrate de la couche des 50 premiers mètres était faible ( $< 1,0 \text{ mmol. m}^{-3}$ ).

La zone d'enrichissement superficiel en nitrate est sujette à des oscillations méridiennes parallèles à celles du système de courant équatorial. VOIRURIEZ et HERBLAND (1977 c) situent l'upwelling actif à  $0^{\circ}30'$  S en juillet 1975 (fig. 12), tandis que l'enrichissement en nitrate est centré sur  $2^{\circ}$  S en novembre 1971 (fig. 2) et sur  $2^{\circ}30'$  S en août 1978 (fig. 11).

En octobre 1979, lors d'une station de longue durée (13 jours) à l'équateur, la couche homogène épuisée en nitrate à l'origine s'enrichit régulièrement au cours des huit premiers jours et retrouve son état initial en fin de période (fig. 14). Cet enrichissement superficiel passager est selon toute vraisemblance le résultat d'un transport vers le nord d'une masse d'eau remontée en surface au sud et à l'est de la station d'observation. La durée de la phase d'enrichissement, liée à celle de refroidissement superficiel, est de 8 jours soit une demi-période d'oscillation du système équatorial (DÜING *et al.* (1975) ; HISARD *et al.* (1977) ; CORNUS and MEINCKE (1979)). HISARD *et al.* (1977) parlent de l'éclatement à l'équateur de lentilles d'eau froide avec une période plus ou moins régulière d'environ 15 jours. HERBLAND et LE BOUTELLER (1980), pendant une expérience similaire en février 1979, ont montré l'influence de cette même oscillation sur les distributions de chlorophylle et de production primaire. A court terme en conséquence, la distribution verticale de nitrate à l'équateur semble être modulée au rythme des oscillations nord-sud du système de courant équatorial.

Il n'y a pas qu'à l'équateur où l'on constate des variations saisonnières dans la distribution du

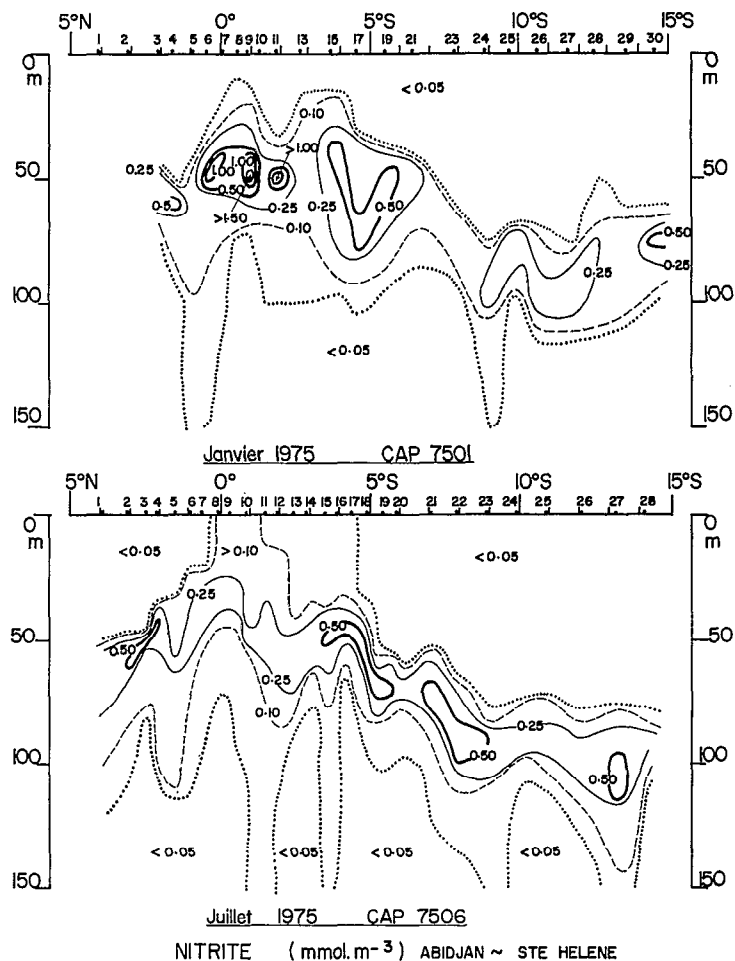


Fig. 15. — Distributions verticales de nitrite ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) entre Abidjan et Sainte-Hélène en janvier 1975 (CAPRICORNE 7501) et en juillet 1975 (CAPRICORNE 7506)

Vertical distribution of nitrite ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) between Abidjan and Saint Helena Island in January 1975 (CAPRICORNE 7501) and in July 1975 (CAPRICORNE 7506)

nitrate et en particulier dans l'enrichissement des couches superficielles. Les upwellings côtiers et les dômes thermiques, engendrés par des conditions météorologiques et une circulation superficielle particulières et variables suivant la saison, offrent des distributions de nitrate très différentes suivant l'époque de l'année. Que ce soit le long de la côte congo-gabonaise ou le long de la côte ivoirienne, c'est en été boréal, saison froide dans le Golfe de Guinée (MORLIÈRE et RÉBERT, 1972; WAUTHY, 1977) qu'est le plus prononcé l'enrichissement superficiel en nitrate. Les dômes thermiques, liés à la circulation cyclonique, atteignent leur point culminant à des saisons différentes suivant l'hémisphère : c'est en août que le Dôme de Guinée est le mieux développé et que la nitracline est la plus proche de la surface (VOITURIEZ et DANDONNEAU, 1974) et en février

celui d'Angola (GALLARDO *et al.*, 1974). VOITURIEZ (1981) dans son analyse décrivant le mécanisme de formation des dômes thermiques tropicaux fait remarquer que si celui de Guinée est censé apparaître régulièrement chaque année (en été boréal), celui d'Angola est un phénomène beaucoup plus aléatoire.

### 2.3.2. VARIATIONS SAISONNIÈRES DE LA DISTRIBUTION DE NITRITE

La zone équatoriale ( $0^{\circ}$ - $5^{\circ}$  S) où se manifestent les effets de la remontée d'eau froide et riche en nitrate en juillet (fig. 12) s'enrichit également en nitrite (fig. 15). La distribution méridienne des concentrations de surface supérieures à  $0,10 \text{ mmol. NO}_2.\text{m}^{-3}$  confirme les limites de l'advection verticale



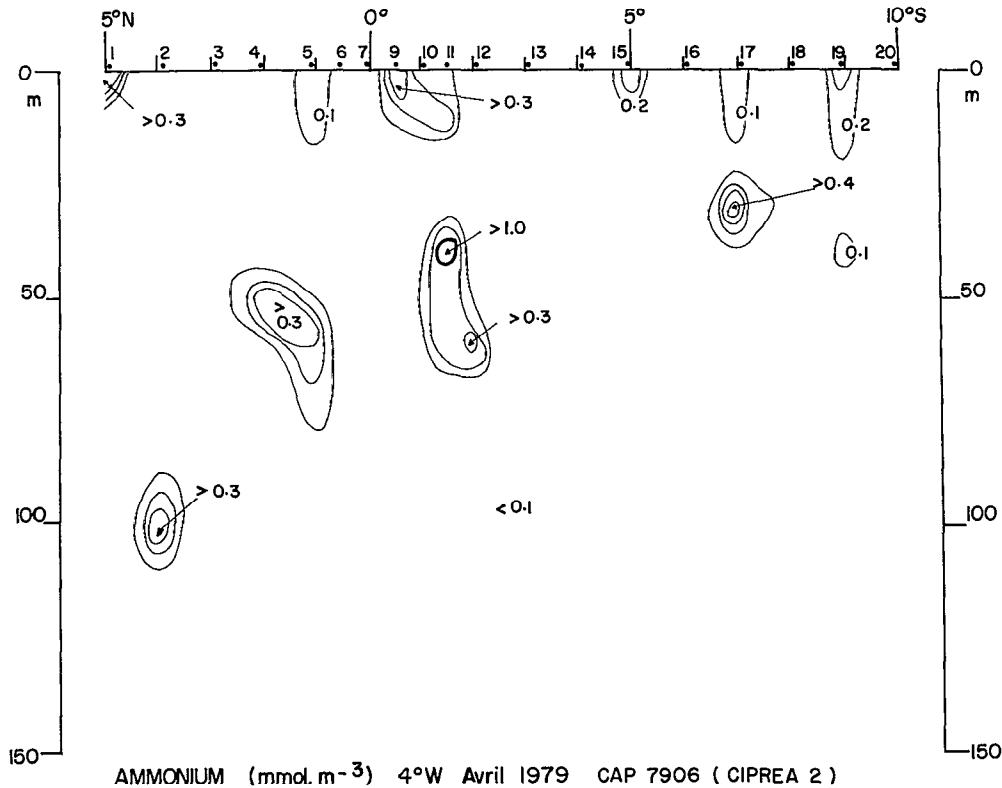


FIG. 16. — Distribution verticale d'ammonium ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) le long du méridien  $4^{\circ}$  W en avril 1979 (CAPRICORNE 7906)  
*Vertical distribution of ammonium ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) along  $4^{\circ}$  W in April 1979 (CAPRICORNE 7906)*

à  $0^{\circ}30' - 1^{\circ}30' \text{ S}$ , avancées par VOITURIEZ et HERBLAND (1977 c). En effet dans l'hypothèse de formation du nitrite par la réduction phytoplanctonique du nitrate dans des conditions limitantes de lumière (VOITURIEZ et HERBLAND, 1977 b), le nitrite ne peut être formé qu'en subsurface à la base de la couche euphotique et le nitrite présent en surface ne peut provenir que de l'advection verticale, comme le nitrate d'ailleurs. Une autre différence saisonnière dans la distribution du nitrite est la disparition en juillet des fortes concentrations de nitrite (supérieures à  $0,50 \text{ mmol. m}^{-3}$ ) relevées à 50 mètres à l'équateur en janvier. Cette abondance moindre de nitrite en saison froide, alors que la concentration de nitrate est la plus élevée à ce niveau pourrait être le reflet de la forte turbulence qui règne à l'équateur en période d'upwelling (VOITURIEZ et HISARD, 1975) : celle-ci réduirait l'activité du phytoplancton en même temps qu'elle accélérerait la diffusion de nitrite vers le haut. En dehors de ces deux modifications, on ne relève pas d'autres variations saisonnières notables dans la distribution méridienne du nitrite.

### 2.3.3. VARIATIONS SAISONNIÈRES DE LA DISTRIBUTION D'AMMONIUM

Il apparaît d'après les mesures d'ammonium en avril 1979 (fig. 16) effectuées à la suite de celles du mois d'août précédent (fig. 8) que l'ammonium serait en zone équatoriale ( $5^{\circ} \text{ N} - 10^{\circ} \text{ S}$ ) moins abondant en saison chaude qu'en saison froide. Cet épuisement en ammonium pourrait être dû à une pression plus forte des producteurs primaires pour qui l'ammonium représente l'unique source disponible d'azote minéral en saison chaude. LE BORGNE (1977) attribue une importance plus grande à l'excrétion minérale azotée du zooplancton (ammonium) en mars qu'en août dans la ration alimentaire du phytoplancton. D'ailleurs l'urée, autre produit d'excrétion azotée des animaux, est plus utilisée en février-mars qu'en juillet-août (HERBLAND et VOITURIEZ, 1977 b). L'absence d'ammonium dans le milieu ne signifie pas que ce sel soit inexistant mais elle est plutôt le signe d'une réassimilation très rapide de l'azote minéral excrété : VOITURIEZ et DANDONNEAU (1974) admettent que dans le Dôme

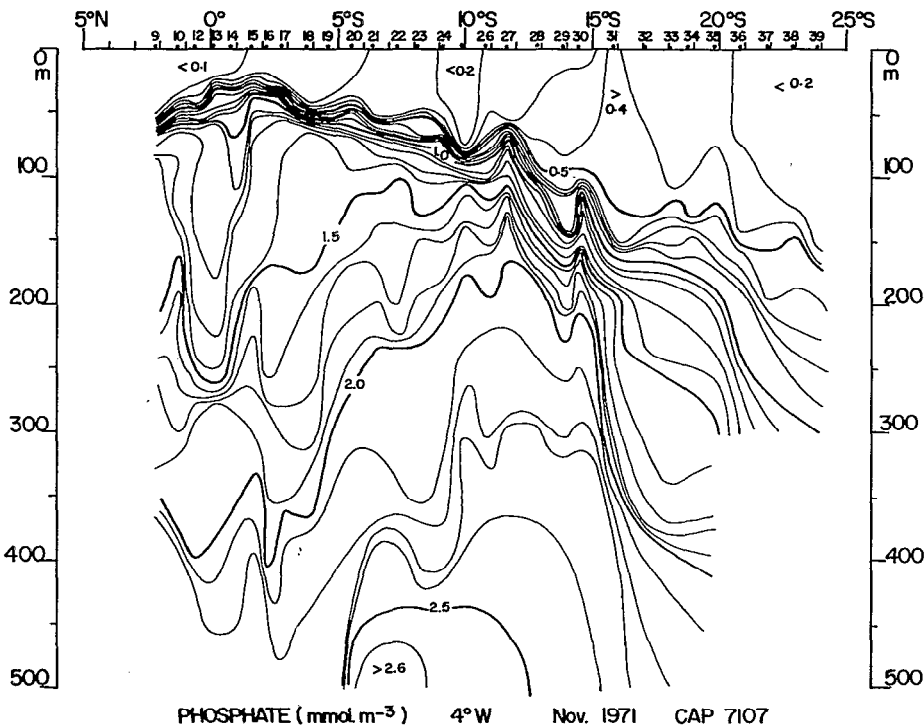


Fig. 17. — Distribution verticale de phosphate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) le long du méridien  $4^{\circ}$  W en novembre 1971 (CAPRICORNE 7107)  
*Vertical distribution of phosphate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) along  $4^{\circ}$  W in November 1971 (CAPRICORNE 7107)*

de Guinée le stock d'ammoniaque est négligeable devant l'excrétion journalière d'azote ammoniacal.

### 3. PHOSPHORE

#### 3.1. Aspects de la chimie du phosphore dans l'eau de mer. Forme dosée et méthode de dosage

Le phosphore présent dans l'eau de mer existe sous une grande variété de formes, regroupées arbitrairement en deux grandes classes « Soluble » et « Insoluble ». Chaque classe est subdivisée en plusieurs fractions caractérisées par des techniques analytiques différentes : STRICKLAND et PARSONS (1968) ont reconnu huit fractions. Nous ne traitons ici que du phosphore minéral soluble c'est-à-dire l'ion orthophosphate, qui réagit directement avec le molybdate. C'est la forme directement assimilable par le phytoplancton et la fraction majeure de l'excrétion zooplanctonique.

Le phosphate est un des premiers sels nutritifs pour lesquels une méthode convenable de dosage a été disponible et les informations sur sa distribution ne manquent pas. Pourtant de par son caractère non limitant dans la production primaire des océans,

il a moins retenu l'attention que le nitrate dans les dernières recherches sur les mécanismes de production. Nous avons employé pour son dosage la méthode classique de MURPHY et RILEY (1962), à l'acide ascorbique, automatisée sur Auto-Analyseur TECHNICON II.

#### 3.2. Variations spatiales de phosphate

En zone tropicale les concentrations de phosphate dans la couche de surface sont généralement faibles, de l'ordre de  $0,1$  à  $0,2 \text{ mmol. PO}_4 \cdot \text{m}^{-3}$  (fig. 17). Mais contrairement aux sels minéraux azotés l'épuisement total en phosphate se rencontre très rarement. En novembre le long du méridien  $4^{\circ}$  W (fig. 17), les concentrations superficielles les plus faibles ( $0,1 \text{ mmol. m}^{-3}$ ) sont relevées au nord de l'équateur, zone traditionnellement oligotrophe de la convergence nord-équatoriale; les concentrations les plus élevées sont notées à  $16^{\circ}$  S, là où a été relevé précédemment un enrichissement superficiel en nitrate (fig. 2), dans la dérive de Benguela (LEMASSON et RÉBERT, 1977 a). La phosphacline (couche de gradient vertical de phosphate élevé) est la plus proche de la surface à  $2^{\circ}$  S, dans la crête thermique déjà décrite à propos

de la distribution méridienne de nitrate. Les similitudes dans les distributions de phosphate et de nitrate sont nombreuses, les mécanismes physiques et biologiques contrôlant leurs distributions étant les mêmes. Nous notons en subsurface la pauvreté équatoriale du Sous Courant Équatorial par rapport aux eaux adjacentes nord et sud : ce courant transporte des eaux salées formées dans les zones particulièrement oligotrophes des anticyclones tropicaux sud et nord. Au sud de l'équateur, entre 5 et 15° S, les eaux en dessous de 200 mètres sont plus riches que de part et d'autre : ce sont les eaux dérivées des eaux côtières angolaises définies précédemment comme étant le siège d'une régénération intensive de sels nutritifs.

La distribution verticale du phosphate est donc très proche de celle de nitrate. Pourtant en examinant de près gradient de phosphate et gradient de nitrate, celui de phosphate débute en général plus près de la surface que celui de nitrate. Ce décalage  $PO_4$ - $NO_3$  (fig. 18) a été signalé et analysé à plusieurs reprises en zone tropicale (VOITURIEZ et DANDONNEAU, 1974; HERBLAND et VOITURIEZ, 1977 a). Ces auteurs interprètent l'écart entre phosphacline et nitracline comme l'indice d'une régénération des sels nutritifs. Il existe naturellement dans l'océan une relation de proportionnalité nitrate-phosphate (fig. 19) qui est le reflet de l'équilibre consommation-reminéralisation : la droite de régression a une pente voisine de 16, rapport théorique de composition élémentaire moyenne N/P du plancton (REDFIELD *et al.*, 1963). Le phosphate et le nitrate, amenés dans la couche euphotique dans le rapport théorique 16 et consommés au même taux devraient donc avoir des

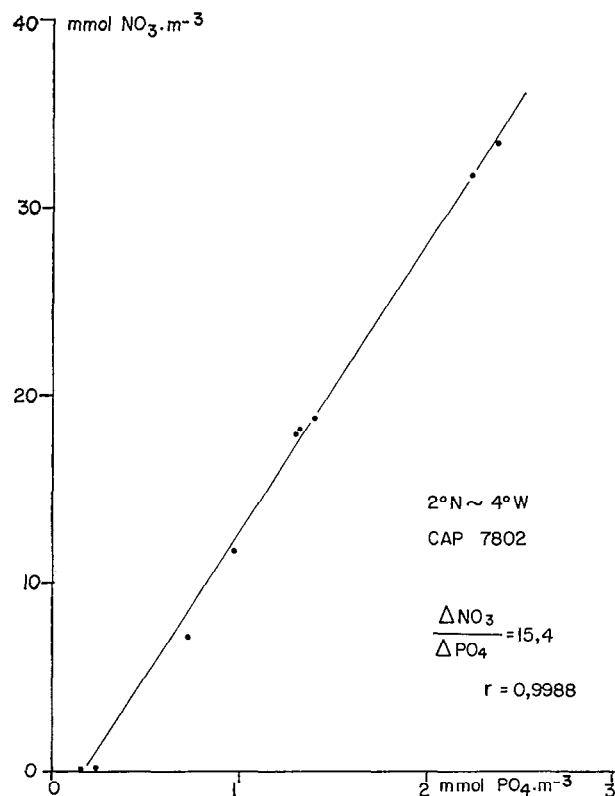


Fig. 19. — Diagramme nitrate-phosphate (CAPRICORNE 7802)

Diagram nitrate-phosphate (CAPRICORNE 7802)

distributions parallèles. Il n'en est rien, comme en témoigne le décalage ci-dessus qui traduit une accumulation de phosphate. Cet excès ne peut venir que du zooplancton qui excrète de l'ammonium et du phosphate mais pas de nitrate (LE BORGNE, 1977). La distribution de l'ammonium vient à l'appui de cette hypothèse : figure 18, on observe un maximum d'ammonium au bas de la couche épuisée en nitrate.

### 3.3. Variations saisonnières de phosphate

Les variations extrêmes de distribution de nitrate, notamment en surface, entre saison chaude et saison froide se retrouvent sur la distribution de phosphate entre la situation d'avril et celle d'août (fig. 20). En avril, pratiquement toute la zone superficielle comprise entre 5° N et 10° S a une concentration de phosphate inférieure à 0,2 mmol.  $PO_4$ . $m^{-3}$ ; seule la frange côtière nord a une concentration supérieure à 0,3 mmol.  $PO_4$ . $m^{-3}$ , conséquence d'un upwelling faible devant la Côte d'Ivoire à cette époque de l'année (LEMASSON et RÉBERT, 1973 b).

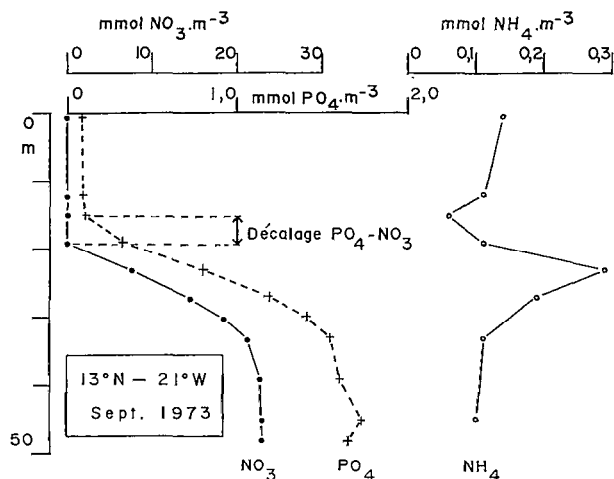


Fig. 18. — Comparaison des distributions verticales de nitrate, phosphate et ammonium (mmol.  $m^{-3}$ ) (CAPRICORNE 7313)  
Comparison of the vertical distributions of nitrate, phosphate and ammonium (mmol.  $m^{-3}$ ) (CAPRICORNE 7313)

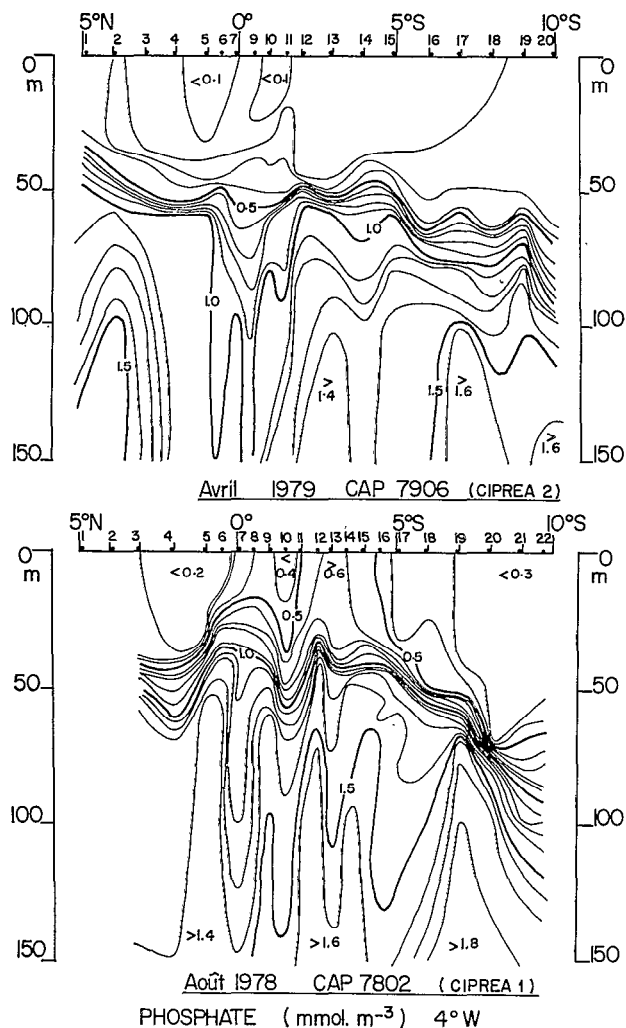


FIG. 20. — Distributions verticales de phosphate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) le long du méridien  $4^{\circ}$  W en avril 1979 (CAPRICORNE 7906) et en août 1978 (CAPRICORNE 7802)

Vertical distributions of phosphate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) along  $4^{\circ}$  W in April 1979 (CAPRICORNE 7906) and in August 1978 (CAPRICORNE 7802)

En août, saison froide, la couche de surface s'est particulièrement enrichie entre  $0^{\circ}$  et  $5^{\circ}$  S et montre un maximum d'enrichissement à  $3^{\circ}$  S (plus de  $0,6 \text{ mmol. PO}_4 \cdot \text{m}^{-3}$ ) dans la divergence équatoriale. La dualité des mécanismes d'apport de phosphate dans la couche superficielle apparaît clairement au niveau de l'isoplethe  $0,5 \text{ mmol. PO}_4 \cdot \text{m}^{-3}$  : divergence équatoriale centrée sur  $3^{\circ}$  S et mélange vertical turbulent à la frontière supérieure du Sous Courant Équatorial à l'équateur. De même que le Sous Courant Équatorial est apparu moins riche en nitrate en janvier qu'en juillet (fig. 12), il apparaît

moins riche en phosphate en avril qu'en août (fig. 20). En profondeur (en dessous de 100 mètres) entre  $5^{\circ}$  et  $10^{\circ}$  S, les eaux sont plus riches en phosphate en saison froide qu'en saison chaude, comme cela était le cas déjà en nitrate.

#### 4. SILICIUM

##### 4.1. Aspects de la chimie du silicium dans l'eau de mer. Forme dosée et méthode de dosage

Le silicium est présent dans l'eau de mer à l'état dissous et particulaire. Sous forme particulaire, le silicium est le constituant essentiel des structures solides extracellulaires des diatomées, silicoflagellés et radiolaires. Sous forme dissoute le silicium est représenté par l'acide silicique très peu ionisé dans l'eau de mer (environ 5 %). Comme la méthode de détermination du silicium dissous dans l'eau de mer dépend de la formation du complexe silicomolybdique et que seul l'acide silicique ionisé ou dispersé à l'état moléculaire réagit, seules les espèces dissoutes d'acide silicique sont dosées : ce sont celles susceptibles d'être utilisées par les diatomées (ARMSTRONG, 1965), qui constituent la famille la plus nombreuse des populations phytoplanctoniques des eaux chaudes tropicales. A côté de la fraction particulaire de silicium dérivé des structures de diatomées et autres organismes siliceux, il y a des particules d'argile transportées en suspension dans l'eau des rivières et dégradées dans la mer : cette contribution peut jouer un rôle important sur la teneur en silicate près des côtes où débouchent des fleuves de grand débit (Amazonne-Congo).

La méthode employée pour nos mesures de silicium dissous est la méthode automatique de BREWER et RILEY (1966) adaptée à l'Auto-Analyseur TECHNICON II, qui repose sur la réduction du complexe silicomolybdique jaune par le métol. Les solutions étalons sont préparées à partir de silicofluorure de sodium, comme recommandé par STRICKLAND et PARSONS (1968). Nous avons choisi de garder comme représentation du « silicate réactif » le symbole  $\text{SiO}_3$ , correspondant à l'ion silicate du composé  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , utilisé autrefois comme étalon.

##### 4.2. Variations spatiales de silicate

A l'image des autres sels nutritifs, les eaux de surface entre Abidjan et Sainte-Hélène contiennent peu de silicate (fig. 21) : en moyenne de  $1,0$  à  $2,0 \text{ mmol. SiO}_3 \cdot \text{m}^{-3}$ . Mais contrairement au nitrate, la couche de surface n'est jamais complètement épuisée en silicate. De plus on note une dissymétrie entre les extrémités nord et sud (fig. 21) : devant la Côte d'Ivoire la concentration en surface dépasse

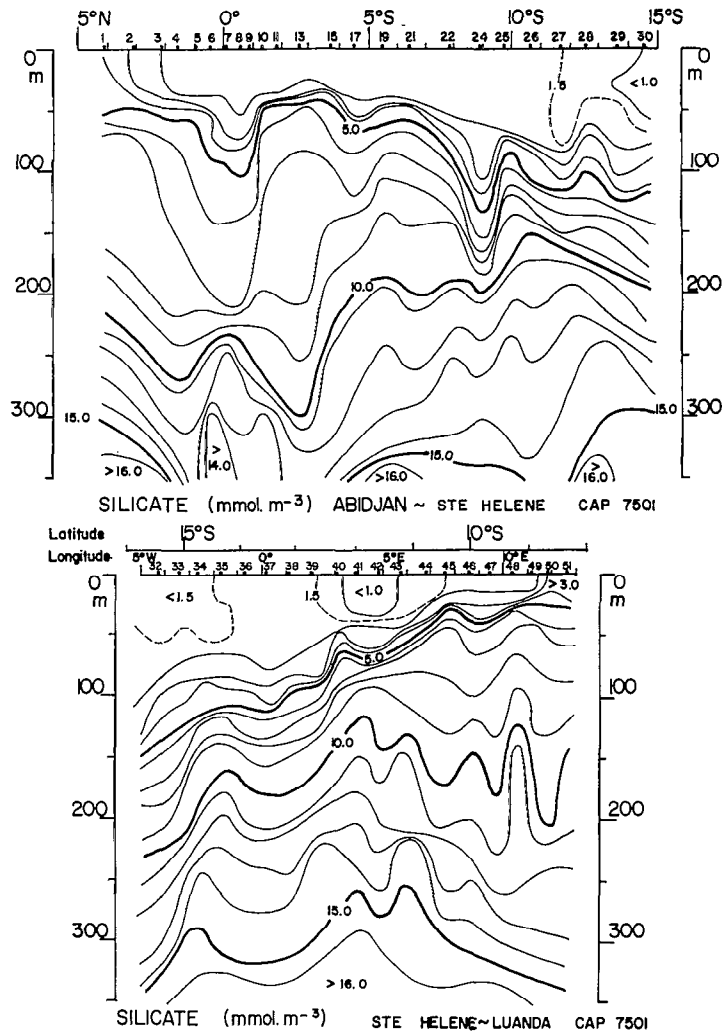


Fig. 21. — Distributions verticales de silicate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) entre Abidjan et Sainte-Hélène et entre Sainte-Hélène et Luanda en janvier 1975 (CAPRICORNE 7501)

Vertical distributions of silicate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) between Abidjan and Saint Helena Island and between Saint Helena and Luanda in January 1975 (CAPRICORNE 7501)

$3,0 \text{ mmol. SiO}_3 \cdot \text{m}^{-3}$  et près de Sainte-Hélène elle est inférieure à  $1,0 \text{ mmol. SiO}_3 \cdot \text{m}^{-3}$ . Cette particularité de distribution méridienne du silicate illustre la relation inverse bien connue entre l'acide silicique et la salinité (SPENCER, 1975) et reproduit les extrema de la distribution méridienne de salinité : eau dessalée ( $S < 35,0 \cdot 10^{-3}$ ) au nord et maximum de salinité subtropical ( $S > 36,5 \cdot 10^{-3}$ ) au sud (VOITURIEZ et HERBLAND, 1977 c).

L'augmentation de silicate avec la profondeur en dessous de la couche homogène est moins rapide que celle de nitrate, et ce malgré des concentrations beaucoup plus élevées de silicate que de nitrate dans les eaux profondes (1 000 mètres). A 150 mètres la

concentration de silicate n'atteint jamais  $10,0 \text{ mmol. m}^{-3}$  (fig. 21) alors que celle de nitrate, au même niveau, dépasse largement ce seuil (fig. 12 en haut). Sur un profil vertical (fig. 22), la différence entre les taux d'accroissement des deux sels est encore plus nette : entre 50 et 80 mètres, le gradient de silicate ( $0,15 \text{ mmol. m}^{-4}$ ) est quatre fois plus faible que celui de nitrate ( $0,62 \text{ mmol. m}^{-4}$ ). Cette faible augmentation de silicate dans les premières couches thermoclineales tient à la lenteur du processus de régénération de ce sel. D'après les divers essais de dissolution de frustules de diatomées (ARMSTRONG, 1965; SPENCER, 1975) il s'ensuit que le processus naturel au sein de la mer est un phénomène lent :

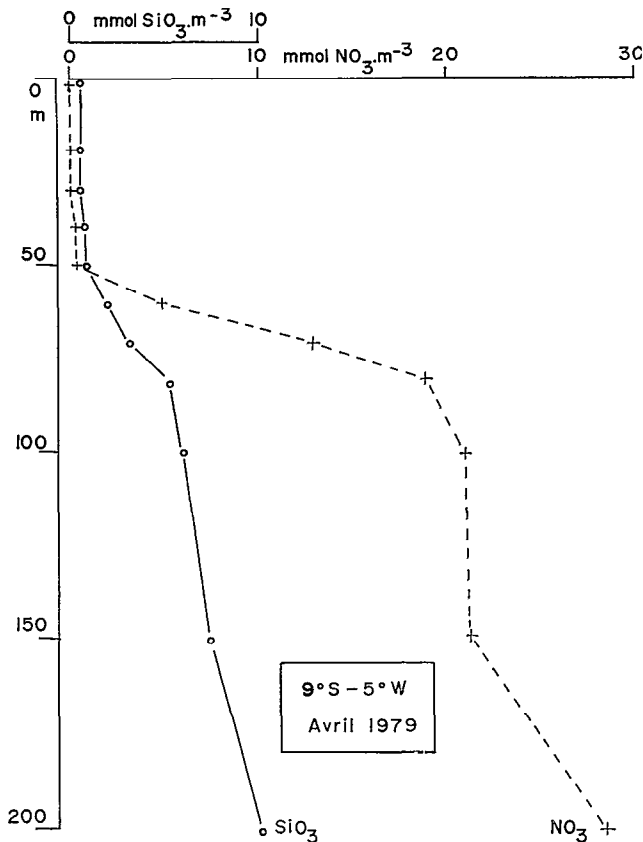


FIG. 22. — Comparaison des distributions verticales de silicate et de nitrate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) (CAPRICORNE 7906)  
 Comparison of the vertical distributions of silicate and nitrate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) (CAPRICORNE 7906)

c'est pourquoi la majeure partie du stock de silicate se retrouve dans les couches les plus profondes (en dessous de 1 000 mètres) et qu'un bon nombre de frustules de diatomées se retrouvent dans les sédiments.

La distribution verticale du silicate peut être affectée aussi par les facteurs physiques tel que l'advection horizontale. Le Sous Courant Équatorial, identifié en subsurface par son noyau de salinité élevée est moins riche en silicate que les eaux adjacentes nord et sud (fig. 21 en haut). En dessous de 200 mètres au sud de  $5^{\circ}$  S, la richesse en silicate est à rapprocher de celle de nitrate (fig. 2) et de phosphate (fig. 17); la richesse de cette eau est attribuée à sa circulation le long de la côte angolaise. La diminution des concentrations de silicate dans les couches en dessous de 200 mètres entre les coupes Sainte-Hélène-Luanda et Sainte-Hélène-Abidjan (fig. 21) est un argument en faveur de l'advection zonale vers l'ouest. Entre l'île Sainte-Hélène et la côte angolaise, les premières couches riches en silicate

se rapprochent très nettement de la surface au voisinage de  $10^{\circ}$  S, c'est-à-dire dans la région du Dôme d'Angola (GALLARDO *et al.*, 1974) : l'isoplethe  $5,0 \text{ mmol. SiO}_3 \cdot \text{m}^{-3}$  remonte de 150 à 20 mètres. A la surface, tout près de la côte, la concentration dépasse  $3,0 \text{ mmol. SiO}_3 \cdot \text{m}^{-3}$  : cette augmentation peut être attribuée aux eaux du fleuve Congo, dont l'embouchure est toute proche (fig. 1), et dont l'influence peut se faire sentir loin au sud (WAUTHY, 1977).

La distribution de silicate à la surface de la mer dans le fond du Golfe de Guinée présente des particularités intéressantes au plan hydrologique (fig. 23) : des teneurs très différentes en silicate pour des eaux également dessalées. Dans cette région, une masse d'eau froide et salée (fig. 23 en bas), rencontrée en surface sous la double action de la divergence équatoriale et de l'upwelling côtier au sud du Cap Lopez (HISARD *et al.*, 1975), est confrontée dans la partie orientale du Golfe de Guinée avec deux masses d'eaux dessalées : l'une au nord de l'équateur originaire de la Baie de Biafra (Nigeria), l'autre au sud de l'équateur qui est l'extension vers l'ouest de la dessalure due au fleuve Congo (WAUTHY, 1977). La classification des eaux de surface du Golfe de Guinée proposée par Berrit il y a vingt ans, qui a longtemps fait autorité au plan international, a été récemment révisée par WAUTHY (1977) : ce dernier a mis en lumière l'importance de la contribution des eaux de ruissellement apportées par le fleuve Congo sur la dessalure superficielle de la région. La relation inverse acide silicique-salinité (SPENCER, 1975), qui représente la trace des eaux continentales dans l'océan permet de vérifier la nature différente de la dessalure de part et d'autre du Cap Lopez. Au nord du Cap Lopez la dessalure de la Baie de Biafra provient surtout d'un excès de précipitations sur la mer (BERRIT, 1966) et l'eau de pluie contient très peu de sels dissous. Au sud, la dessalure est attribuée au fleuve Congo qui ramène à la mer les eaux de pluies tombées sur une grande partie de l'Afrique Centrale (WAUTHY, 1977) et par conséquent très enrichies en silice dissoute après un intensif lessivage des sols. Aussi la distribution superficielle de silicate permet-elle de vérifier l'origine des eaux dessalées du Golfe de Guinée. En dépit du caractère non conservatif bien connu des sels nutritifs, le silicate, à la différence du nitrate et du phosphate, paraît donc être un traceur hydrologique précieux dans certaines circonstances.

#### 4.3. Variations saisonnières de la distribution de silicate

Les changements saisonniers de la distribution de silicate ne sont pas très différents de ceux des

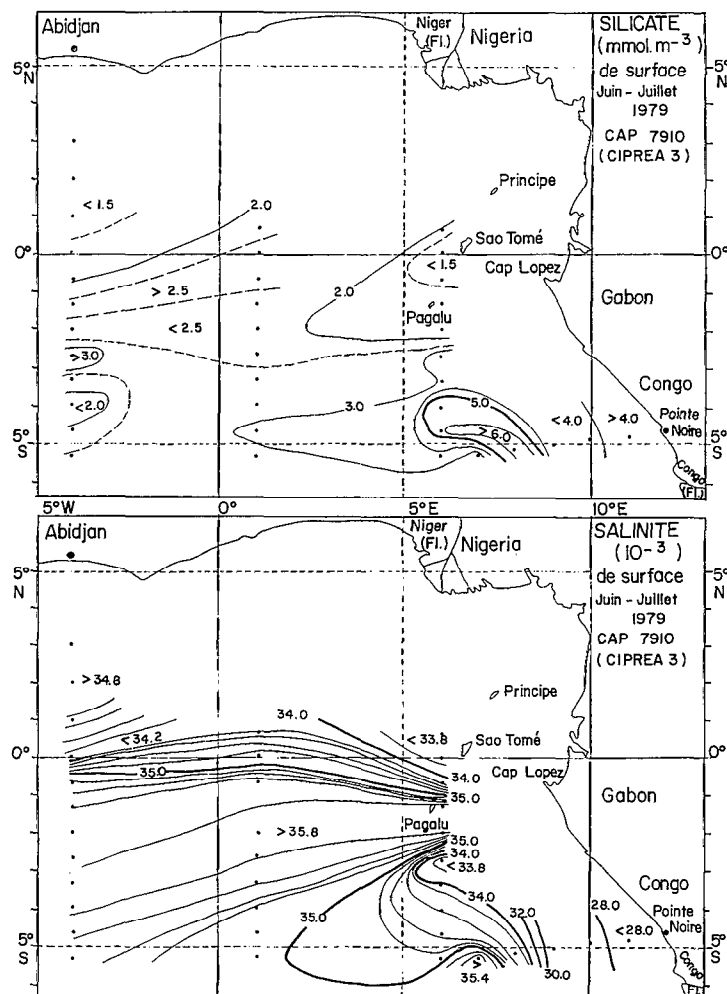


FIG. 23. — Distributions de silicate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) et de salinité ( $10^{-3}$ ) à la surface de la mer en juin-juillet 1979 (CAPRICORNE 7910)  
*Distributions of silicate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) and salinity ( $10^{-3}$ ) at the sea surface in June-July 1979 (CAPRICORNE 7910)*

autres sels entrevus précédemment. D'avril à août, en surface (fig. 24), la zone équatoriale  $0^{\circ}$ - $5^{\circ}$  S, s'enrichit en silicate sous le double effet de la divergence équatoriale à  $2^{\circ}30'$  S et du mélange turbulent vertical à l'équateur. Compte tenu du faible gradient vertical de silicate signalé précédemment, l'enrichissement estival reste faible, comparé à ceux de nitrate et phosphate. La dissymétrie entre les extrémités nord (concentration  $> 3,0 \text{ mmol.m}^{-3}$ ) et sud (concentrations  $< 1,0 \text{ mmol.m}^{-3}$ ) relevée en saison chaude (janvier-avril) a pratiquement disparu en été. En subsurface on retrouve l'enrichissement habituel en sels nutritifs du Sous Courant Équatorial, entre saison chaude et saison froide, ainsi que l'enrichissement des couches en dessous de 100 mètres vers  $8^{\circ}$  S.

## 6. CONCLUSIONS

La couche homogène de surface dans le Golfe de Guinée, à l'instar des autres zones tropicales, siège d'une production continue est la plupart du temps complètement épuisée en nitrate, nitrite et ammonium et très appauvrie en phosphate et silicate. Dans la thermocline, où le défaut de lumière anihile la consommation phytoplanctonique, la régénération l'emporte et les sels nutritifs voient leur concentration augmenter rapidement avec la profondeur : ces sels nutritifs restent généralement séparés de la couche euphotique par la barrière de densité qu'est la thermocline tropicale et constituent la réserve profonde bien connue des composés minéraux nutritifs.

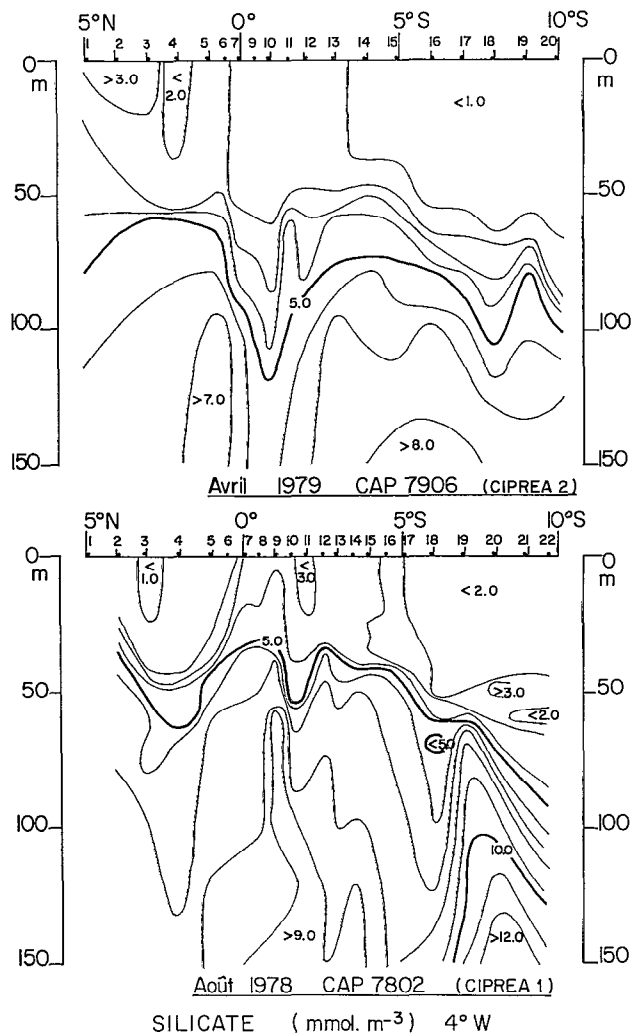


FIG. 24. — Distributions verticales de silicate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) le long du méridien  $4^{\circ}$  W en avril 1979 (CAPRICORNE 7906) et en août 1978 (CAPRICORNE 7802)

Vertical distributions of silicate ( $\text{mmol. m}^{-3}$ ) along  $4^{\circ}$  W in April 1979 (CAPRICORNE 7906) and in August 1978 (CAPRICORNE 7802)

Si une telle distribution verticale est représentative de la majeure partie du Golfe de Guinée, il existe cependant certaines zones où cette distribution n'est plus respectée. Par suite des conditions météorologiques et de la circulation superficielle, il arrive que la couche homogène disparaisse ou soit très réduite en épaisseur. En zone équatoriale et le long de certaines côtes (Congo-Gabon à l'est, Côte d'Ivoire au nord) un upwelling saisonnier apporte en surface des eaux froides et riches en sels nutritifs. En d'autres endroits, les couches riches en sels nutritifs se rapprochent considérablement de la surface sans

toutefois l'atteindre : c'est le cas des dômes (Angola dans l'hémisphère sud et Guinée dans l'hémisphère nord). Au plan de la production primaire la structure en dôme est aussi intéressante que l'upwelling car il suffit que les couches chargées de sels nutritifs atteignent un niveau suffisant de lumière pour stimuler la production, ce qui est généralement le cas. Compte tenu de la très forte stabilité verticale régnant en zone tropicale, la diffusion verticale turbulente des sels nutritifs est réduite. A l'équateur toutefois le fort gradient vertical de vitesse horizontale qui s'établit entre le Courant Équatorial de surface et le Sous Courant Équatorial (Courant de Lomonosov) intensifie suffisamment le mélange vertical turbulent pour qu'il soit un facteur important d'enrichissement des couches superficielles. L'advection horizontale peut également modifier la distribution méridienne des sels nutritifs : elle est supposée jouer un rôle dans l'enrichissement équatorial superficiel et dans celui relevé à  $15^{\circ}$  S dans la dérive de Benguela. En subsurface le Sous Courant Équatorial constitué d'eaux issues des régions oligotrophes des anticyclones tropicaux sud et nord est appauvri en sels nutritifs, tandis qu'au sud de l'équateur, entre  $5^{\circ}$  et  $15^{\circ}$  S, les eaux qui ont circulé en profondeur le long de la côte angolaise, devant laquelle en surface la production de matière vivante est intense, sont marquées par un état de régénération avancée en sels nutritifs.

Les processus physiques d'enrichissement des couches superficielles sont des phénomènes limités dans le temps liés aux variations saisonnières de la circulation de surface. C'est en été boréal (de juin à septembre), pendant la saison froide, que l'on note les plus fortes concentrations de sels nutritifs à l'équateur et le long des côtes est et nord du Golfe de Guinée. Les dômes créés par la circulation cyclonique reflètent les variations saisonnières de cette circulation : le Dôme de Guinée, avec une nitracline accentuée et proche de la surface, est le mieux marqué en été boréal (août) et celui d'Angola en hiver boréal (février).

Mis à part le nitrite et l'ammonium, qui ont des distributions verticales particulières, les trois autres sels nutritifs (nitrate-phosphate-silicate), les plus abondants, ont des distributions très voisines. Toutefois des différences apparaissent en raison des vitesses de régénération plus ou moins rapides de chacun de ces sels. Ainsi le phosphate qui est excrété directement dans le milieu par les animaux planctoniques augmente plus près de la surface que le nitrate qui n'est pas rejeté directement sous cette forme dans le milieu et nécessite différentes étapes d'oxydation à partir de l'ammonium. Le silicate, dont la régénération dépend de la dissolution des frustules de diatomées au cours de leur sédimentation, processus lent, augmente beaucoup moins vite avec la profon-



deur, dans la thermocline, que le nitrate. Le silicate présente une originalité sur les autres sels nutritifs : la relation inverse le liant à la salinité en fait dans certaines circonstances un outil précieux pour les études hydrologiques à la surface de l'océan. La distribution verticale du nitrite en zone tropicale revêt un intérêt particulier, car l'horizon où disparaît ce sel en profondeur marque la limite inférieure

de la couche de production primaire. La zone équatoriale renferme très peu d'ammonium en saison chaude : cet appauvrissement est interprété comme le signe d'un recyclage très rapide de ce sel dans la couche euphotique.

*Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'O.R.S.T.O.M.  
le 1<sup>er</sup> juillet 1983*

### BIBLIOGRAPHIE

- ARMSTRONG (F. A. J.), 1965. — Silicon. In: *Chemical Oceanography*, vol. 1, J. P. Riley and C. Skirrow (Eds), Academic Press London : 409-432.
- BENSCHNEIDER (K.) and ROBINSON (R. J.), 1952. — A new spectrophotometric method for the determination of nitrite in sea water. *J. Mar. Res.*, 11 : 87-96.
- BENSON (B. B.) and PARKER (P. D. M.), 1961. — Nitrogen/argon and nitrogen isotopic ratios in aerobic sea water. *Deep Sea Res.*, 7 : 237-253.
- BERRIT (G. R.), 1966. — Les eaux dessalées du Golfe de Guinée. *C.R.O. Abidjan, Doc. Sci.*, 9.
- BREWER (P. G.) and RILEY (J. P.), 1966. — The automatic determination of silicate-silicon in natural waters with special reference to sea water. *Anal. Chim. Acta*, 35 : 514-519.
- CORNUS (H. P.) and MEINCKE (J.), 1979. — Observation of near surface layer changes related to the Atlantic equatorial undercurrent, *Deep Sea Res.*, 26 : 1291-1299.
- CROMWELL (T.), 1953. — Circulation in a meridional plane in the central equatorial Pacific. *J. Mar. Res.*, 12 : 196-213.
- CUSHING (D. H.), 1975. — Production cycles in space and time. In: *Marine Ecology and Fisheries*, Cambridge Univ. Press : 1-24.
- DUGDALE (R. C.) and GOERING (J. J.), 1967. — Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity. *Limnol. Oceanogr.*, 12 : 196-206.
- DUGDALE (R. C.), MENZEL (D. W.) and RYTHER (J. H.), 1961. — Nitrogen fixation in the Sargasso Sea. *Deep Sea Res.*, 7 : 297-300.
- DÜING (W.), HISARD (P.), KATZ (F.), MEINCKE (J.), MILLER (L.), MOROSHKIN (K. V.), PHILANDER (G.), RIBNIKOV (A. A.), VOIGT (K.) and WEISBERG (R.), 1975. — Meanders and long waves in the equatorial Atlantic. *Nature*, 257 : 280-284.
- GALLARDO (Y.), DANDONNEAU (Y.) et VOITURIEZ (B.), 1974. — Variabilité, circulation et chlorophylle dans la région du dôme d'Angola en février-mars 1971. *Doc. Sci. C.R.O. Abidjan*, 5 : 1-51.
- GRASSHOFF (K.) and JOHANNSEN (H.), 1972. — A new sensitive and direct method for the automatic determination of ammonia in sea water. *J. Cons. inter. Explor. Mer*, 34 : 516-521.
- HERBLAND (A.) et VOITURIEZ (B.), 1977a. — Production primaire, nitrate et nitrite dans l'Atlantique tropical. I. — Distribution du nitrate et production primaire. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. XV, n° 1 : 47-55.
- HERBLAND (A.) et VOITURIEZ (B.), 1977b. — Étude de la production pélagique de la zone équatoriale de l'Atlantique à 4° W. V — Observations sur l'action hétérotrophe. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. XV, n° 4 : 375-387.
- HERBLAND (A.) et LE BOUTELLER (A.), 1980. — The meanders of equatorial current : influence on the biological processes, *F.G.G.E. Symposium*, Paris, juin 1980.
- HISARD (P.), 1973. — Variations saisonnières à l'Équateur dans le Golfe de Guinée. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. XI, n° 3 : 349-358.
- HISARD (P.), CITEAU (J.) et MORLIÈRE (A.), 1975. — Le Courant de Lomonosov et la formation de la zone frontale du Cap Lopez (Baie de Biafra, Golfe de Guinée), *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. XIII, n° 2 : 107-116.
- HISARD (P.), CITEAU (J.) et VOITURIEZ (B.), 1977. — Equatorial undercurrent influences on enrichment processes of upper waters in the Atlantic Ocean. *GATE WORKSHOP*, Miami, March 1977.
- KAISER (W.) and POSTEL (L.), 1979. — Importance of the vertical nutrient flux for biological production in the Equatorial Undercurrent Region at 30° W. *Mar. Biol.*, 55 : 23-27.
- LE BORGNE (R.), 1977. — Étude de la production pélagique de la zone équatoriale de l'Atlantique à 4° W. III — Respiration et excrétion d'azote et de phosphore du zooplancton. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. XV, n° 4 : 349-362.
- LEMASSON (L.) et RÉBERT (J. P.), 1973a. — Circulation dans la partie orientale de l'Atlantique Sud. *Doc. Sci. C.R.O. Abidjan*, 4 : 91-124.

- LEMASSON (L.) et RÉBERT (J. P.), 1973b. — Les courants marins dans le golfe ivoirien. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. XI, n° 1 : 67-95.
- MORLIÈRE (A.) et RÉBERT (J. P.), 1972. — Étude hydrologique du plateau continental ivoirien. *Doc. Sci. C.R.O. Abidjan*, 3 : 1-30.
- MURPHY (J.) and RILEY (J. P.), 1962. — A modified simple solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, 27 : 31-36.
- OU DOT (C.), 1978. — Continuité zonale et circulation méridienne du maximum de nitrite dans le Pacifique équatorial sud-ouest. II — Interprétation : un aspect de la régénération des sels nutritifs. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. XVI, nos 3-4 : 363-376.
- OU DOT (C.), 1982. — La distribution de l'azote moléculaire N<sub>2</sub> dans l'Atlantique Équatorial Oriental. *Mar. Chem.*, 11 : 573-588.
- REDFIELD (A. C.), KETCHUM (B. H.) and RICHARDS (F. A.), 1963. — The influence of organisms on the composition of sea water. In: *The Sea*, vol. 2, M. N. Hill (Ed.), Wiley Interscience : 26-77.
- SPENCER (C. P.), 1975. — The micronutrients elements. In: *Chemical Oceanography 2nd edition*, vol. 2. J. P. Riley and G. Skirrow (Eds), Academic Press London : 245-300.
- STRICKLAND (J. D. H.) and PARSONS (T. R.), 1968. — A practical handbook of seawater analysis. *Fish. Res. Board Canada Bull.* 167, 311 p.
- VACCARO (R. F.), 1965. — Inorganic nitrogen in sea water. In: *Chemical Oceanography*, vol. 1, J. P. Riley and G. Skirrow (Eds), Academic Press London : 356-408.
- VOITURIEZ (B.), 1980. — The equatorial upwelling in the eastern Atlantic : problems and paradoxes, *IODE Coastal Upwelling Symposium*, Los Angeles, February 1980.
- VOITURIEZ (B.), 1981. — Les Sous-Courants Équatoriaux nord et sud et la formation des dômes thermiques tropicaux. *Oceanol. Acta*, 4 (4) : 497-506.
- 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.) and HISARD (P.), 1975. — Nutrient enrichment in the equatorial upwelling : a comparison between the Atlantic and the Pacific Oceans. *Third International Symposium of Upwelling Ecosystems*, Kiel, August 1975.
- VOITURIEZ (B.) et HERBLAND (A.), 1977 a. — Observation d'un maximum secondaire de nitrite dans l'Atlantique tropical (Dôme de Guinée). *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. XV, n° 1 : 39-46.
- VOITURIEZ (B.) et HERBLAND (A.), 1977 b. — 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.
- VOITURIEZ (B.) et HERBLAND (A.), 1977 c. — Étude de la production pélagique de la zone équatoriale de l'Atlantique à 4° W. I — Relations entre la structure hydrologique et la production primaire. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. XV, n° 1 : 313-331.
- WAUTHY (B.), 1977. — Révision de la classification des eaux de surface du Golfe de Guinée (Berrit, 1961). *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. XV, n° 3 : 279-295.
- WOOD (E. D.), ARMSTRONG (F. A. J.), RICHARDS (F. A.), 1967. — Determination of nitrate in sea water by cadmium - copper reduction to nitrite. *J. Mar. Biol. Ass. U. K.*, 47 : 23-31.