

ÉTUDE DE LA PRODUCTION PÉLAGIQUE DE LA ZONE ÉQUATORIALE DE L'ATLANTIQUE A 4° W

I - RELATIONS ENTRE LA STRUCTURE HYDROLOGIQUE ET LA PRODUCTION PRIMAIRE

BRUNO VOITURIEZ et ALAIN HERBLAND

Océanographes O.R.S.T.O.M., C.R.O., B.P. V 18, Abidjan, Côte d'Ivoire.

RÉSUMÉ

Les fortes productions observées toute l'année dans la région équatoriale de l'Atlantique est correspondent à deux types d'enrichissement qui définissent deux saisons différentes :

— Une saison chaude qui prédomine (d'octobre à juin) caractérisée par l'existence, sous une couche homogène chaude et épuisée en nitrate, d'une crête thermique vers 2°-3° S.

— Une saison froide d'upwelling de juillet à septembre marquée par un refroidissement et un enrichissement en nitrate de la surface à l'équateur. L'upwelling équatorial est dû à l'augmentation des mélanges verticaux du fait de la remontée du courant de Lomonossov et de l'accélération du courant équatorial de surface.

En saison chaude la crête thermique, semblable aux dômes, est un système productif à deux couches séparées par le sommet de la « nitracline » : la couche supérieure à sels nutritifs limitants et la couche profonde à lumière limitante. La production primaire et la chlorophylle sont maximales au sommet de la « nitracline » dont le niveau est déterminé par celui du gradient vertical maximal de densité qui fait écran à la diffusion des sels nutritifs. Le courant de Lomonossov n'allère pas la distribution verticale des paramètres de la production même lorsque le maximum de production se trouve au cœur de ce courant. Dans la crête thermique la production primaire calculée atteint 70 mgC/m².h.

En période d'upwelling la barrière de densité est insuffisante pour maintenir un système à deux couches. L'essentiel de la production est situé en surface. L'extension en surface des eaux d'upwelling est limitée vers le nord par un front thermique ou elles plongent sous les eaux moins salées du golfe de Guinée. Vers le sud elles s'étendent jusque vers 5° S. La production mesurée à l'équateur dans l'upwelling peut atteindre 100 mgC/m².h mais elle n'est pas toujours supérieure à celle mesurée en l'absence d'upwelling. Cette relative faiblesse de la production est sans doute due à la forte turbulence qui limite le maintien du phytoplancton dans de bonnes conditions d'éclairement.

ABSTRACT

The high productions observed all the year in the eastern equatorial Atlantic Ocean correspond to two seasons and two types of enrichment :

— During the warm season from October to June a thermal ridge occurs at 2°-3° S below a warm and nitrate exhausted mixed layer.

— During the cold season (July-September) an upwelling takes place at the equator bringing cold and nutrient rich water to the surface. The summer equatorial upwelling is due to the increase of the vertical mixing induced by the high vertical shear occurring between the westward equatorial surface current and the eastward equatorial undercurrent. The vertical shear is strongly reinforced in summer by the acceleration of the surface current (110 Cm/s) and the shallowing of the undercurrent. In the pycnocline at 0°30' S the Richardson number Ri equals 5 in January 1975 and only 0.3 in August 1975.

The thermal ridge is similar to the thermal domes and belongs to the « typical tropical situations » in which two layers are separated by the top of the nitracline: the upper one is nutrient limited and the deeper one light limited. In such a situation the primary production and chlorophyll maxima are located at the top of the « nitracline » the depth of which is defined by that of the vertical density gradient maximum which controls the vertical diffusion of nutrients. The equatorial undercurrent does not modify the vertical structure of the production layer even when the maximum of primary production occurs in its core. The primary production reaches $70 \text{ mgC/m}^2\cdot\text{h}$ in the thermal ridge but is variable in the undercurrent where it depends on the vertical turbulence which defines the depth of the nitracline.

During the upwelling season the weakening of the vertical density gradient makes the upper poor layer to disappear. The primary production is concentrated in the surface layer. The upwelled waters at the equator move southwards bringing rich nutrient waters to 5° S . They are stopped northwards by a thermal front where they dive below the low salinity waters of the Guinea Gulf. The primary production at the equator during the upwelling season can reach about $100 \text{ mgC/m}^2\cdot\text{h}$ but it is not always higher than the production at the warm season. The high turbulence in the equatorial upwelling can account for limiting the production despite of the propitious light and nutrient conditions.

1. INTRODUCTION

Les campagnes Equalant I et II en 1963 (KOLESNIKOV, 1973), les campagnes du Zvezda à 5° W et 10° W de 1963 à 1965, les cartes de température de surface de MAZEIKA (1968 a) ont montré l'existence, dans la région équatoriale du golfe de Guinée de deux saisons : une saison chaude d'octobre à juin et, de juin à septembre, une saison froide qui correspond à l'apparition d'un upwelling équatorial. Les variations saisonnières de l'upwelling décrites à 5° W et 10° W par SEDIKH et LOUTOCHKINA (1971) ont un impact sur la production équatoriale du golfe de Guinée, dont TCHMIR (1971) a pu établir le cycle suivant pour la période 1963-1965 : production maximale entre juin et septembre, décroissance d'octobre à décembre, production minimale de janvier à mai. A 5° W la valeur moyenne de la production entre 1° N et 5° S était maximale en septembre 1965 ($718 \text{ mgC/m}^2\cdot\text{j}$) et minimale en avril 1963 ($46,5 \text{ mgC/m}^2\cdot\text{j}$). Cependant il semble que la situation durant Equalant II en été 1963 qui sert actuellement de référence pour la saison froide ne corresponde pas en réalité à une véritable situation d'upwelling : le refroidissement de surface est très faible (les températures restent supérieures à 24° C) et les coupes présentées par CORCORAN et MAHNKEN (1969) ne font pas apparaître d'accroissement des teneurs en phosphate de la surface. L'augmentation de la production constatée semble plutôt due à une crête thermique au sud de l'équateur qu'à un upwelling équatorial. En revanche en août 1974 à 10° W pendant GATE (HISARD, GITEAU, VOITURIEZ, 1977) et en juillet-août 1975 à $40^\circ 30' \text{ W}$ (VOITURIEZ et HISARD, 1975) on a observé un refroidissement beaucoup plus important centré sur l'équateur ($T = 20,3^\circ \text{ C}$) accompagné de la disparition de la couche homogène et d'un spectaculaire enrichissement en nitrate de la surface ($\text{NO}_3\text{N} = 5 \mu\text{atg/l}$). Un tel enrichissement n'avait pas été observé auparavant dans l'Atlantique équatorial et, même s'il était exceptionnel, il montre que l'on peut rencontrer

dans l'Atlantique est des situations analogues à celles du Pacifique équatorial.

C'est l'analyse du contraste observé entre la saison d'upwelling et la saison chaude et de sa conséquence sur la production primaire qui fait l'objet de cet article.

2. MÉTHODES

Les résultats utilisés sont ceux du navire océanographique CAPRICORNE autour du méridien 4° W

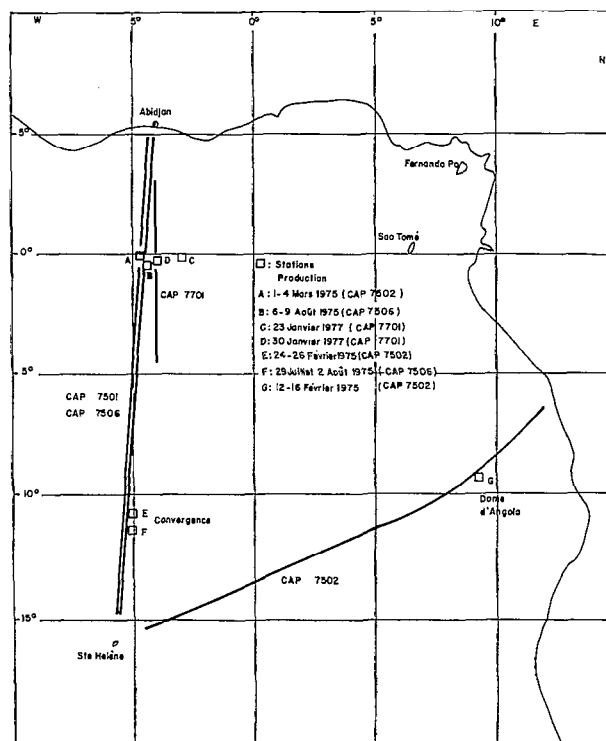


Fig. 1. — Plan des campagnes utilisées.
Scheme of the CAPRICORNE Cruises.

et plus particulièrement ceux des campagnes 7501 et 7502 de janvier à mars 1975, ceux de la campagne 7506 en juillet-août 1975 et ceux de la campagne 7701 en janvier 1977 (fig. 1). L'article s'appuie sur les sections transéquatoriales et sur des stations fixes de production faites à la latitude du courant de Lomonossov vers $0^{\circ}30' S$: la station A du 1 au 4 mars 1975 (Campagne 7502), la station B du 6 au 9 août 1975 (Campagne 7506) et les stations C et D des 23 et 30 janvier 1977 (Campagne 7701). Au cours de ces stations fixes des mesures de production primaire *in situ* par une adaptation de la méthode de Steemann NIELSEN (1952) furent faites chaque jour à 8 ou 10 niveaux entre 8 h et 17 h. Les comptages de la radioactivité des filtres par scintillation liquide étaient faits à bord. Les mesures de sels nutritifs, d'oxygène de production primaire et de chlorophylle étaient faites sur le même échantillon prélevé à la rosette associée à la sonde PTSO de manière à pouvoir comparer strictement les distributions verticales de ces paramètres. L'échantillonnage était serré dans la thermocline (5 m) de manière à déterminer avec précision les niveaux caractéristiques de ces distributions. Des mesures de courant navire en dérive ont été également faites au cours de ces campagnes en prenant 500 m comme niveau de référence.

3. MÉCANISMES D'ENRICHISSEMENT

Les sections transéquatoriales faites aux deux saisons de 1975 sont présentées sur les figures 2 et 3. Le contraste apparaît très nettement sur les distributions de température, nitrate et chlorophylle. A la couche homogène chaude épuisée en nitrate, observée en janvier, se substitue en juillet à l'équateur une couche froide en surface et riche en nitrate qui s'étend de $0^{\circ}30' N$ à $5^{\circ} S$. Malgré ce contraste la distribution de la chlorophylle (fig. 2, 3 et 4) montre qu'aux deux saisons, la zone équatoriale est plus productive que les zones adjacentes. Mais cette richesse en chlorophylle se répartit différemment aux deux saisons. En janvier-février les plus fortes valeurs de chlorophylle se trouvent entre $1^{\circ}30' S$ et $3^{\circ} S$ et concentrées dans le maximum thermoclinale alors qu'en juillet la zone riche s'étend de part et d'autre de l'équateur et ne se limite pas à la thermocline. A l'équateur proprement dit il y a un contraste très net entre les deux saisons : pauvre en janvier-février l'équateur est riche en juillet-août (fig. 4). Cette différence se rattache aisément à la structure hydrologique et correspond à deux systèmes d'enrichissement différents. L'un en janvier-février est associé à la crête thermique observée vers $2-3^{\circ} S$ sur les coupes de la figure 2. L'autre système en juillet-août correspond à un upwelling actif centré sur

$0^{\circ}30' S$ à la latitude du courant de Lomonossov caractérisé sur les coupes des figures 2 et 3 par son maximum de salinité subsuperficielle et l'étalement des isothermes entre $1^{\circ} N$ et $2^{\circ} S$. La distribution méridienne de la température à 50 m et les valeurs intégrées de nitrate dans les 100 premiers mètres (fig. 4) illustrent bien cette double structure. En janvier-février entre $1^{\circ} N$ et $1^{\circ} S$ la température à 50 m passe par un maximum et les quantités de nitrate par un minimum. En juillet, en revanche, la température devient minimale à l'équateur et les quantités de nitrate augmentent considérablement. Il est remarquable de noter qu'aux deux saisons les quantités maximales de nitrate sont observées au niveau de la crête de $3^{\circ} S$ qui semble donc persister aux deux saisons comme le suggèrent les coupes de nitrate et de température (fig. 2 et 3).

On peut en conclure qu'il existe deux systèmes d'enrichissement à l'équateur :

- une crête thermique vers $3^{\circ} S$
- un upwelling équatorial saisonnier qui se manifeste en juillet-août.

De ce fait, suivant la saison, l'équateur proprement dit apparaît tantôt comme une zone relativement pauvre tantôt comme une zone riche. Cette distinction entre crête thermique et upwelling rejoint celle faite par CROMWELL (1958) pour qui une crête (« Ridging »), résultat d'un équilibre quasi géostrophique, est le siège de mouvements verticaux très réduits alors que l'upwelling se caractérise par un transport continu vers la surface d'eau subthermoclinale. Selon WYRTKI (1964) il y a entre ces deux phénomènes différence de degré dans les mouvements verticaux et non différence de nature comme le pensait CROMWELL. Néanmoins la distinction reste intéressante du point de vue de la production car il y correspond deux écosystèmes productifs différents : le premier (crête thermique) à sels nutritifs limitants est un système à deux couches séparées par une très forte thermocline alors que dans le second (upwelling) la couche de mélange épuisée en nitrate disparaît et le gradient thermique dans la thermocline s'affaiblit.

3.1. La divergence équatoriale en janvier-mars 1975 : la crête thermique

La crête de $3^{\circ} S$ semble être un trait permanent de la structure thermique dans l'Atlantique équatorial oriental. Observée à $4^{\circ} W$ en novembre 1971 par LEMASSON et RÉBERT (1973) qui pensent qu'elle prolonge la divergence de Benguela (DEFANT, 1936), elle apparaît aussi à $4^{\circ}30' W$ en janvier 1977 (croisière 7701 du Capricorne) et à $10^{\circ} W$ en novembre 1973 (STRETTA, 1975). Elle n'est pas cependant mentionnée par CORCORAN et MAHNKEN (1969) qui ne constatent aucune augmentation de la production

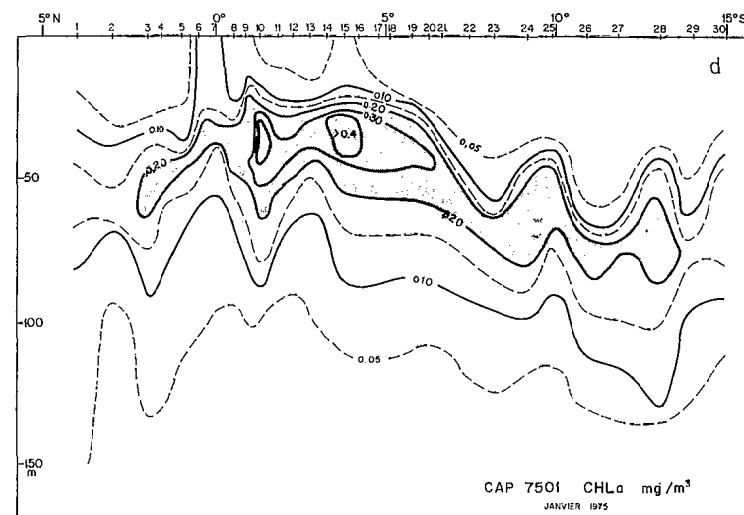
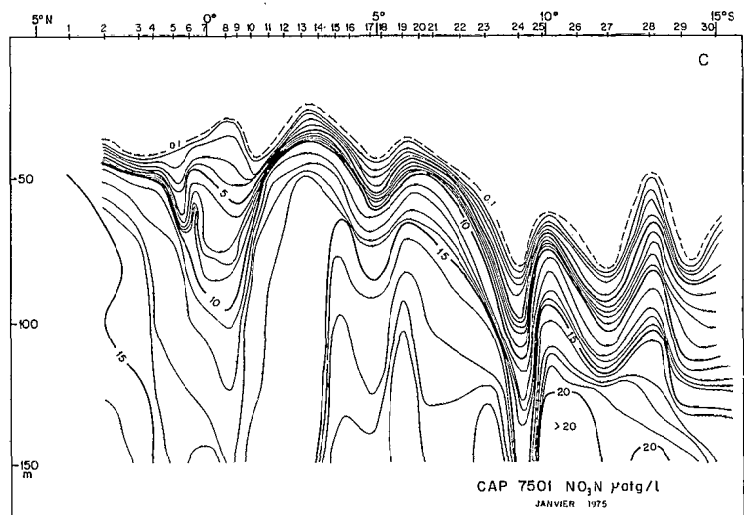
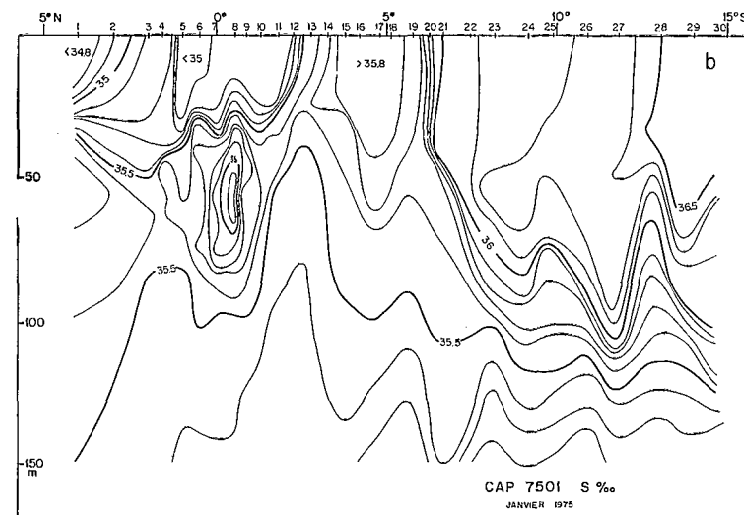
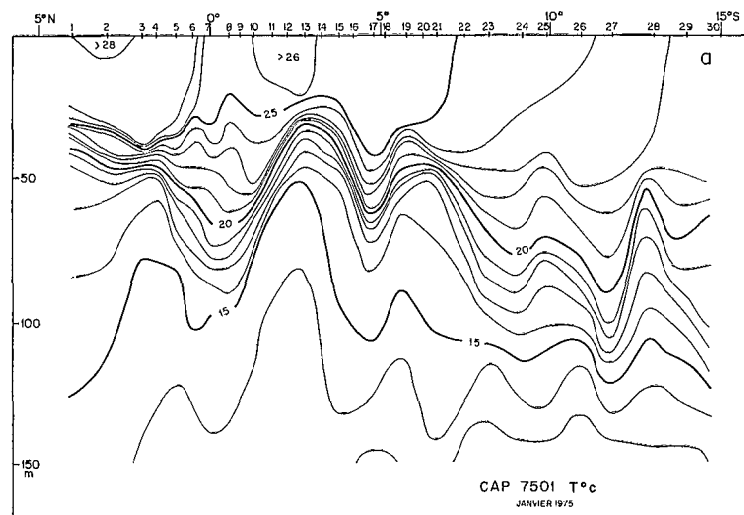


Fig. 2. — Sections transéquatoriales à 4° W en saison chaude (janvier 1975).

a : Température; b : Salinité; c : Nitrate; d : Chlorophylle a

Transequatorial sections at 4° W during the warm season (January 1975).

a : Temperature; b : Salinity; c : Nitrate; d : Chlorophyll a

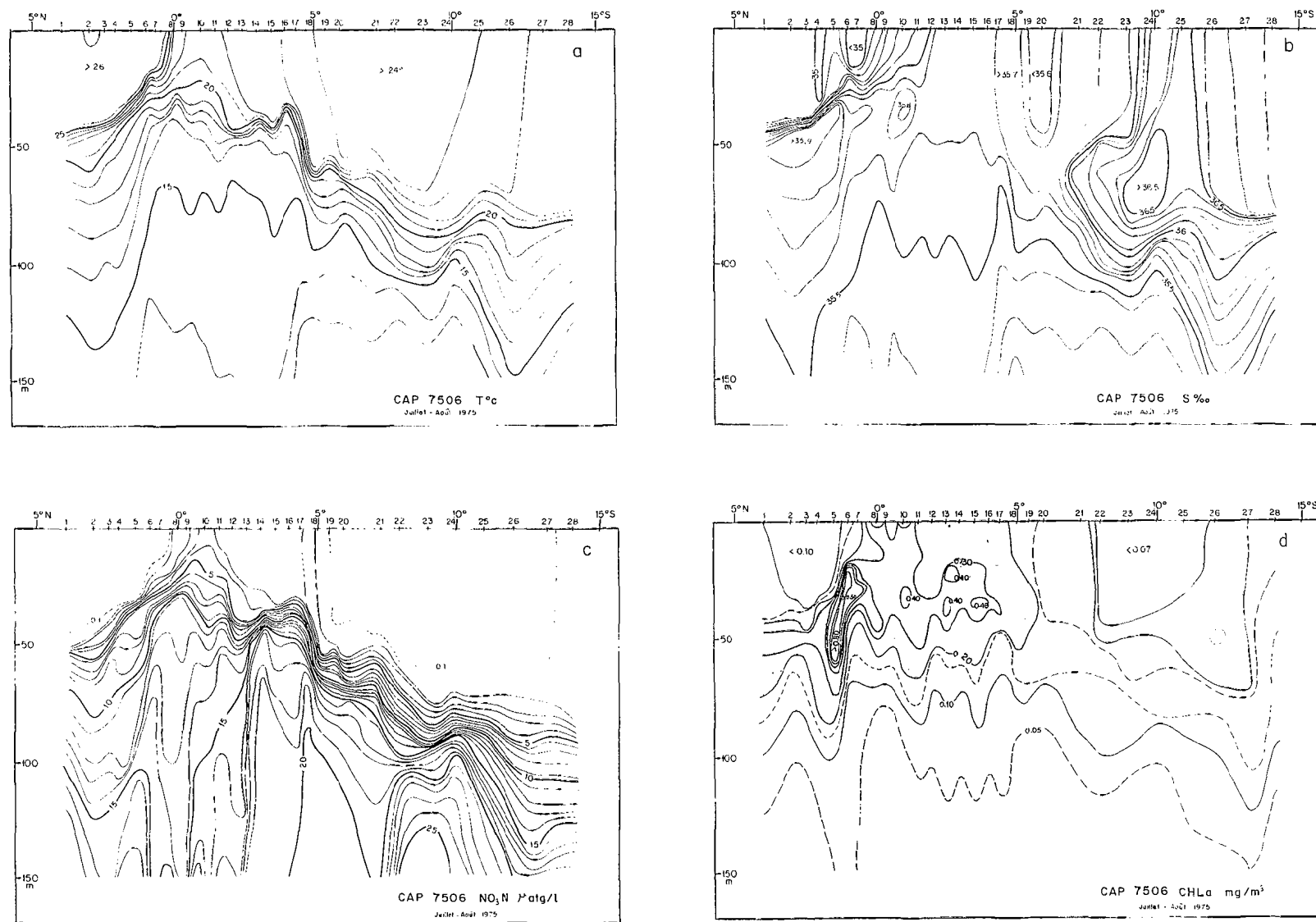


Fig. 3. — Sections transéquatoriale à 4° W pendant l'upwelling (juillet-août 1975).
a : Température ; b : Salinité ; c : Nitrate ; d : Chlorophylle a

Transequatorial sections at 4° W during the upwelling season (July-August 1975).
a : Temperature ; b : Salinity ; c : Nitrate ; d : Chlorophyll a

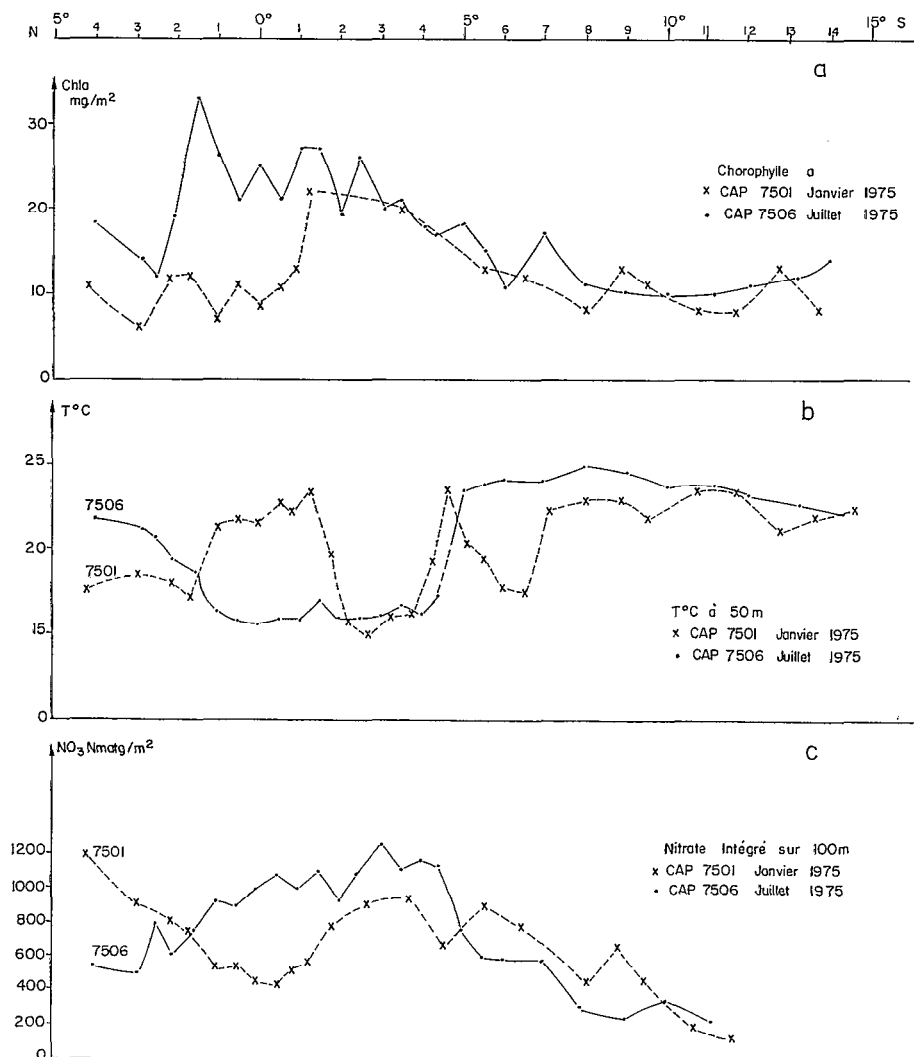


Fig. 4. — Sections transéquatoriales à 4° W en saison chaude (janvier 1975) et saison froide (juillet 1975).

a : Quantité de chlorophylle intégrée sur 100 m (mg/m²).

b : Température à 50 m.

c : Quantité de nitrate intégré dans les 100 premiers mètres (mgat/m²).

Transequatorial sections at 4° W during the warm (January 1975) and the upwelling (July 1975) season.

a : Integrated amount of chlorophyll on 100 m (mg/m²).

b : Temperature at 50 m depth.

c : Integrated amount of nitrate on 100 m (mgat/m²).

dans la zone équatoriale à l'équateur en saison chaude (Equalant I en mars 1963) ni par TCHMIR (1971) qui fait coïncider la saison chaude avec une pauvreté générale de la région équatoriale. Cependant cette crête thermique apparaît nettement à l'est de 20° W sur les cartes de température à 50 m d'Equalant I (KOLESNIKOV, 1973) et dans le golfe de Guinée sur la carte de température à 50 m, de MAZEIKA, rapportée par CORCORAN et MAHNKEN

(1969). Elle apparaît aussi à 5° W dans les travaux de TCHMIR (1971) qui prend la profondeur de l'isoplethe $PO_4P = 10 \mu\text{g/l}$ comme indicateur d'upwelling : on observe à 4° S une crête de cette isoplethe qui passe de plus de 60 m à l'équateur à 40 m à 4° S.

Selon HISARD, CITEAU et VOITURIEZ (1977) cette crête thermique correspond à la divergence équatoriale planétaire qui suivant le schéma de CROMWELL (1953) se trouve déportée au sud de l'équateur sous

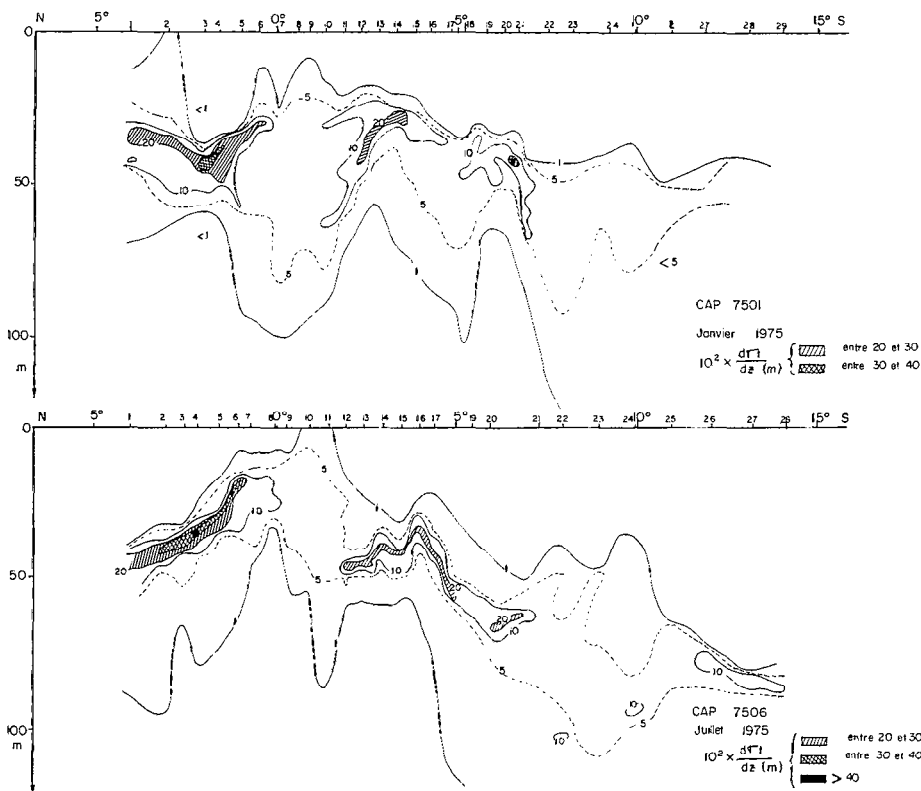


Fig. 5. — Section transéquatoriale du gradient de densité à 4° W en saison chaude (janvier 1975) et en saison froide (juillet 1975).
Transequatorial transect of the vertical density gradient at 4° W during the warm season (January 1975) and the cold season (July 1975).

l'action des alizés qui soufflent du sud-est en permanence dans le golfe de Guinée. Aux deux saisons elle est caractérisée par un fort gradient vertical de densité (fig. 5) signe d'une forte stabilité et d'échanges verticaux réduits. Dans la pycnocline au niveau du maximum du gradient vertical de densité le nombre de Richardson est élevé et semblable aux deux saisons ($Ri = 12$ à la station 13 de 7501 et $Ri = 11$ à la station 14 de 7506). Il s'agit d'une structure analogue aux dômes thermiques (WYRTKI, 1964; VOITURIEZ et DANDONNEAU, 1974), et comme pour les dômes sa stabilité et le maintien d'une couche homogène chaude et épuisée en nitrate impliquent qu'il y a équilibre entre les échanges verticaux et, d'une part, l'énergie thermique reçue en surface, et d'autre part, la consommation biologique du nitrate.

3.2. La divergence équatoriale en juillet-août 1975 : l'upwelling

La situation de l'été 1975 diffère notablement de celle de l'été 1963 (Equalant 2) où l'on ne trouve pas trace d'enrichissement de la surface en sels nutritifs.

SEDIKH et LOUTOCHKINA (1971) ont déjà noté la faiblesse de l'upwelling en été 1963 déduite des températures de surface relativement élevées et des fortes stabilités thermoclinales. Il est à noter d'ailleurs que CORCORAN et MAHNKEN (1969) pour qualifier cette saison parlent de «shallowing» de la thermocline et non pas d'«upwelling». La situation en été 1963 avec un très léger refroidissement de la surface centré sur 2°-3° S (KOLESNIKOV, 1973) correspond en fait simplement au maintien de la crête thermique en cette saison.

D'après la carte de température à 20 m, de MAZEIKA (1968 b), qui montre un minimum de température ($T < 20^\circ \text{C}$) entre 5° W et 10° W il semble que l'upwelling soit maximal entre ces longitudes ; mais les variations interannuelles dans cette région sont vraisemblablement très importantes comme l'ont montré les études faites par SEDIKH et LOUTOCHKINA (1971).

3.2.1. INFLUENCE DU COURANT DE LOMONOSOV

Selon HISARD, CITEAU et VOITURIEZ (1977) les variations locales du vent ne peuvent être retenues

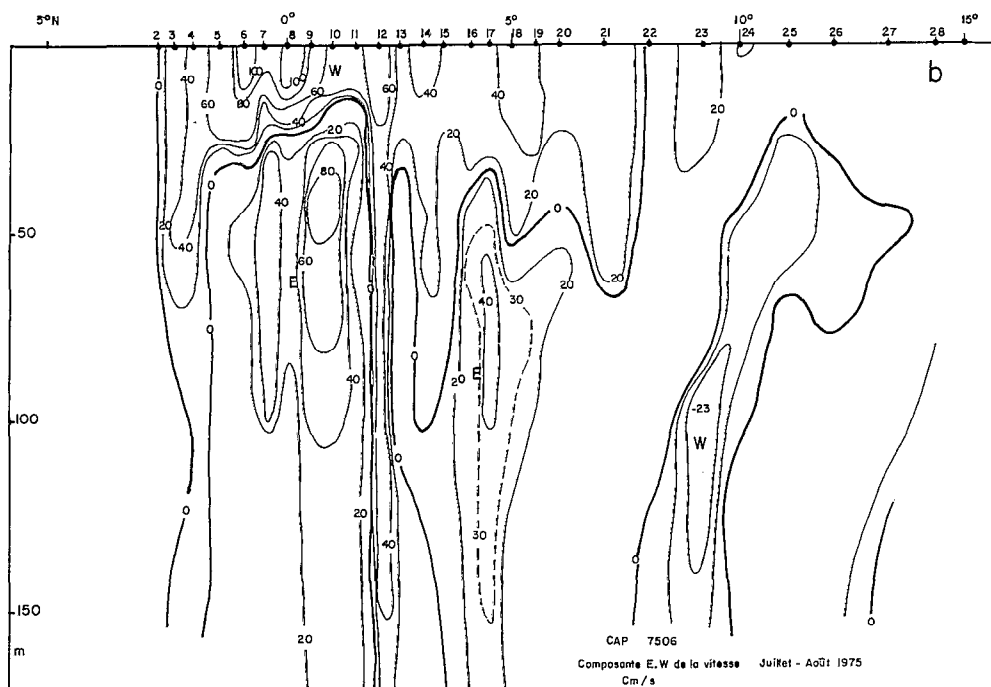
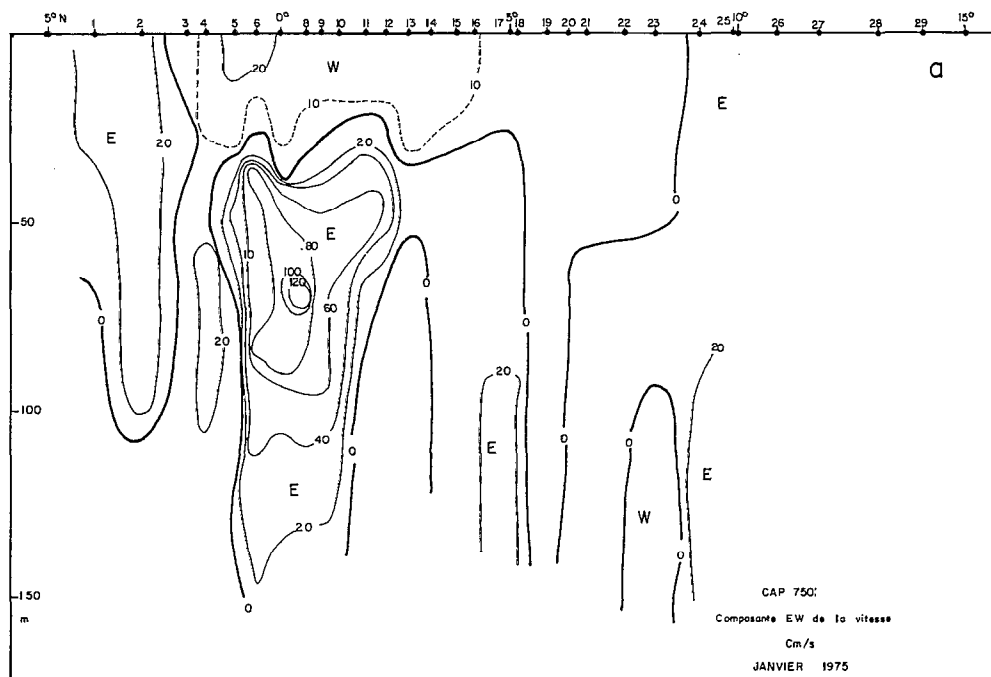


Fig. 6. — Composante Est-Ouest du courant à 4° W.

a : janvier 1975 (saison chaude).

b : juillet 1975 (saison froide).

East-West component of the velocity at 4° W.

a : January 1975 (warm season).

b : July 1975 (upwelling season).

comme seule explication de l'apparition de l'upwelling équatorial. En effet à l'équateur la composante est-ouest du vent ne subit pas de variations notables dans le golfe de Guinée. Seule la composante nord s'intensifie légèrement, ce qui devrait avoir pour conséquence, d'après le schéma de CROMWELL (1953), d'accentuer la dérive vers le sud de la divergence équatoriale ce qui n'est pas le cas. L'explication proposée lie l'apparition de l'upwelling équatorial en été 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 et le sous-courant équatorial (courant de Lomonossov) portant à l'est (fig. 6). Ils ont en effet constaté que d'une part le courant de Lomonossov, qui en hiver boréal est à une profondeur constante tout le long de l'équateur, se rapproche en été boréal de la surface dans l'est de l'océan et passe de 90 m à 33° W à 40 m à 15° W et que d'autre part le courant équatorial de surface est beaucoup plus fort en été qu'en hiver (110 cm/s en juillet 1975 contre 25 cm/s en janvier 1975 sur la figure 6). Sous cette double action le gradient vertical de vitesse est plus fort en été qu'en hiver : 5 cm/s/m en juillet-août 1975 et 2 cm/s/m en janvier 1975 (VOITURIEZ et HISARD, 1975), et renforce les mélanges turbulents. Lors des stations fixes dans le courant de Lomonossov en mars 1975 (St. A) et août 1975 (St. B), au niveau du gradient vertical maximum de densité le nombre de Richardson était en moyenne de 5 en janvier et seulement 0,3 en août ce qui traduit bien l'importance des mélanges turbulents au mois d'août. Le noyau de salinité du courant de Lomonossov est un bon indice de l'importance des mélanges verticaux : bien individualisé en janvier-février 1975 ($S = 36,1 ‰$) il a pratiquement disparu en juillet-août (fig. 2 et 3). D'ailleurs, VOITURIEZ (sous presse) a pu montrer que ce noyau de salinité pouvait être pris comme indicateur de l'intensité de l'upwelling équatorial.

3.2.2. CIRCULATION DE SURFACE : CONSÉQUENCES D'UN UPWELLING SALÉ

L'association des phénomènes d'enrichissement au courant de Lomonossov, les valeurs de température et de nitrate en surface, et le maintien d'un fort gradient de densité, au sud de 2° S, qui freine les échanges verticaux, permettent de délimiter avec précision la remontée des eaux froides à la zone comprise entre 0°30' N et 1°30' S. A partir de cette source la répartition des eaux riches ne se fait pas symétriquement. Vers le nord elles ne dépassent pas 0°30' N et sont arrêtées par un front thermique sous lequel elles plongent alors que vers le sud elles s'étendent en surface jusqu'à 5° S en se réchauffant progressivement sans rencontrer de front thermique (fig. 3).

Cette différence peut s'expliquer d'une part par la composante dirigée vers le sud du courant de surface et d'autre part par la dissymétrie de la distribution de la salinité de surface (fig. 7). En effet WAUTHY (1975) a introduit la notion d'« upwelling salé » pour décrire le mouvement en surface des eaux d'upwelling ; il a montré que dans le Pacifique les eaux de l'upwelling équatorial provenant du courant de Cromwell étaient plus salées que les eaux avoisinantes au nord et au sud si bien que même en se réchauffant en surface elles étaient susceptibles de conserver une densité supérieure et de plonger dès qu'elles sortaient de la zone active d'upwelling. A 4° W dans l'Atlantique la zone équatoriale sépare en surface des eaux peu salées au nord ($S < 35 ‰$) d'eaux salées au sud ($S > 35,7$) (fig. 7). Les eaux d'upwelling qui apparaissent en surface à l'équateur sont les eaux salées du courant de Lomonossov qui se mélangent aux eaux peu salées de la surface si bien qu'elles ont une salinité intermédiaire entre les eaux du nord et les eaux du sud. En se réchauffant en surface elles peuvent acquérir une densité qui reste supérieure à celle des eaux du nord mais qui devient inférieure à celle des eaux du sud. Elles plongent donc au nord sous les eaux de surface plus légères et s'étendent en surface vers le sud en maintenant une forte thermocline. Ce transport vers le sud des eaux relativement salées issues du courant de Lomonossov crée entre 2° S et 5° S une zone homogène en salinité qui sur la coupe de salinité (fig. 3) masque la couche de discontinuité bien réelle sur la coupe de température. Le maintien en surface vers le sud des eaux fraîchement remontées a un impact direct sur la production et HERBLAND et VOITURIEZ (1977 b) ont montré que la relation entre chlorophylle *a* et fluorescence *in vivo* permettait de distinguer la zone d'upwelling actif (0°30' N, 1°30' S) de la zone de transport advectif vers le sud (au sud de 1°30' S).

4. PRODUCTION PRIMAIRE

Dans leur étude de la production primaire dans les régions tropicales HERBLAND et VOITURIEZ (1977 a) ont classé les écosystèmes en deux groupes :

(1) les systèmes tropicaux qualifiés de typiques caractérisés par une couche homogène épuisée en nitrate ;

(2) les autres systèmes correspondant aux upwellings qui contiennent du nitrate en surface.

Ils ont montré que dans tous les systèmes tropicaux typiques y compris dômes et crêtes thermiques les échanges verticaux à travers la thermocline sont faibles si bien que quelles que soient les différences de valeurs de production la structure verticale de la couche de production est la même et qu'il est possible

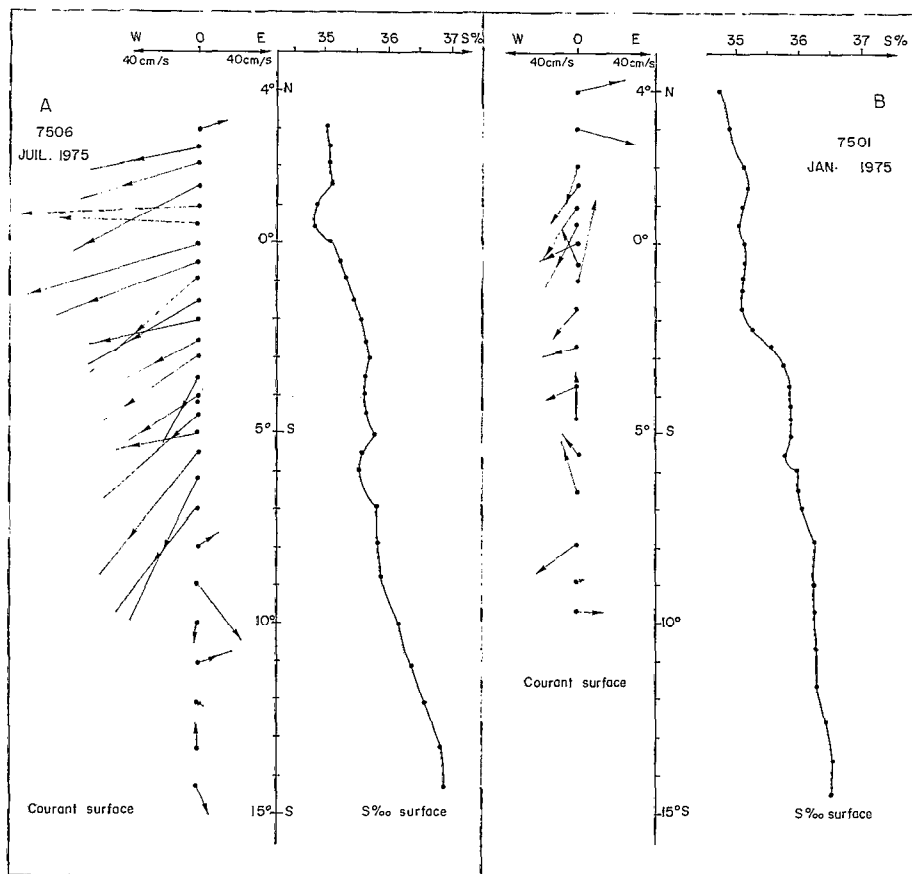


Fig. 7. — Courant et salinité de surface à 4° W.

A : janvier 1975 (saison chaude).

B : juillet 1975 (saison d'upwelling).

Surface velocity and surface salinity along 4° W.

A : January 1975 (warm season).

B : July 1975 (upwelling season).

de la définir à partir des distributions verticales du nitrate et du nitrite.

En effet dans ce type de structure le sommet de la « nitracline » qui ne coïncide pas nécessairement avec la pycnocline, est un niveau critique de la production qui divise la couche euphotique en deux parties : la partie supérieure à sels nutritifs limitants et la partie inférieure à lumière limitante. C'est à ce niveau que la production nouvelle est maximum et que l'on observe le maximum de chlorophylle et, lorsque la nitracline n'est pas trop profonde, le maximum de production primaire. La profondeur de la nitracline est une mesure approximative de l'intensité lumineuse au niveau du maximum de production et il existe une relation linéaire entre la profondeur de la

nitracline et la production primaire intégrée sur la colonne d'eau (HERBLAND et VOITURIEZ, sous presse) :

Production Primaire ($\text{mgC}/\text{m}^2\cdot\text{h}$) = $0.87 \times (\text{Profondeur Nitracline}) + 90.2$ (1)

La distribution du nitrite dérivé de la consommation de nitrate par le phytoplancton permet d'associer le maximum de nitrite à la couche à lumière limitante et de définir avec précision l'épaisseur de la couche de production puisqu'en profondeur la disparition de nitrite coïncide avec l'arrêt de la consommation de nitrate par le phytoplancton (VOITURIEZ et HERBLAND, 1977). Il est donc possible à partir de ces propriétés et en l'absence de mesures directes de reconstituer la distribution de la production primaire dans les situations tropicales typiques.

4.1. Situation tropicale typique : la crête thermique

Selon le critère retenu la situation tropicale typique prédomine à l'équateur dans le golfe de Guinée. C'est elle que l'on a toujours observée sauf en juillet-août. D'ailleurs HERBLAND et VOITURIEZ (1977 a) ont utilisé les mesures de production faites à l'équateur en mai 1975 et en janvier 1977 dans leur analyse des systèmes tropicaux typiques.

4.1.1. DISTRIBUTION MÉRIDIENNE DE LA PRODUCTION PRIMAIRE

La distribution méridienne de la production primaire a été établie sur la figure 8 à partir de la relation (1) liant la production primaire à la profondeur de la nitracine, pour les campagnes 7107 (novembre 1971) et 7701 (janvier 1977) du CAPRI-CORNE. On constate que les plus fortes valeurs de production (70 mgC/m².h) sont situées au sud de

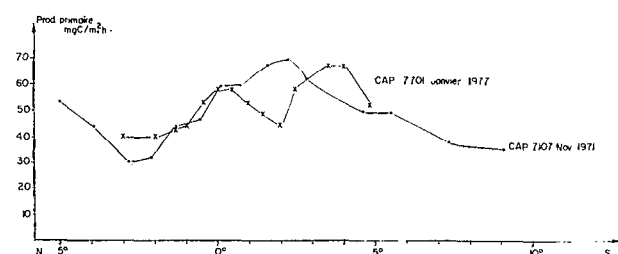


Fig. 8. — Distribution de la production primaire calculée à partir de la relation (1) le long de 4° W en saison chaude.

Primary production along 4° W during the warm season. Primary production is deduced from the following relationship between the integrated primary production (P_i) and the depth of the nitracine (D_{NO_3}):

$$P_i (\text{mgC/m}^2 \cdot \text{h}) = 0.87 \cdot D_{NO_3} + 90.2 \quad (\text{HERBLAND et VOITURIEZ, sous-pressé})$$

l'équateur au niveau de la crête thermique entre 2° et 4° S. Cette valeur est semblable aux valeurs mesurées dans le dôme d'Angola (Tabl. II) et confirme l'analogie signalée précédemment entre les crêtes et dômes thermiques. Il n'est pas possible de faire la même estimation à partir de la campagne 7501 en raison de l'espacement de l'échantillonnage (20 m) qui ne permet pas une définition précise de la profondeur de la nitracine.

4.1.2. DISTRIBUTION VERTICALE DE LA PRODUCTION. RÔLE DU COURANT DE LOMONOSSOV

L'équilibre des situations tropicales typiques implique qu'au sommet de la nitracine la consom-

mation de nitrate par le phytoplancton compense exactement son flux vertical vers la couche homogène. De plus comme c'est aussi au sommet de la nitracine que l'on rencontre la couche riche en nitrate la mieux éclairée on peut penser que la consommation de nitrate par le phytoplancton et par conséquent le flux vertical de nitrate est maximum à ce niveau. La nitracine est donc le résultat de l'équilibre entre un processus physique et un processus biologique. Mais la comparaison du niveau de la nitracine avec le gradient de densité qui est un indice de stabilité montre que c'est le processus physique qui, dans la zone équatoriale, fixe le niveau de la nitracine. En effet on constate (fig. 9) qu'il existe une bonne rela-

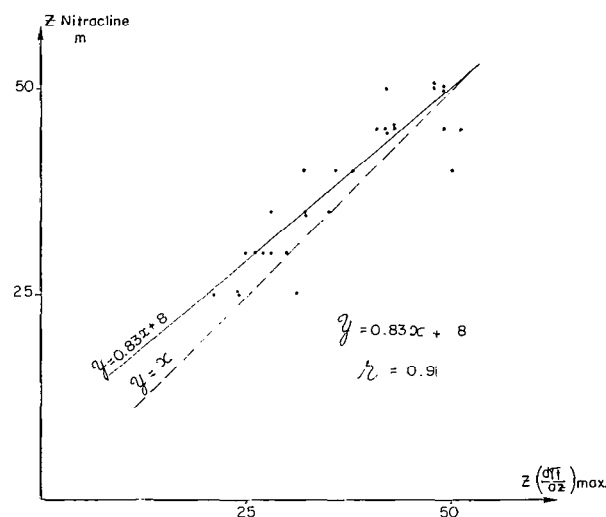


Fig. 9. — Relation entre la profondeur de la nitracine définie par le premier niveau où le nitrate est différent de 0 et la profondeur du gradient vertical de densité maximum.

Relationship between the depth of the nitracine and the depth where the vertical density gradient is maximum. The depth of the "nitracine" is defined by the first level where nitrate content is not zero.

tion entre la profondeur du gradient maximum de densité et celle du sommet de la nitracine défini par le premier niveau de prélèvement où le nitrate n'est pas nul. Cette relation montre que le nitrate ne franchit pas cette barrière de densité puisque le sommet de la nitracine se trouve juste au-dessous du gradient maximum de densité (fig. 9 et 10). Il en résulte que le maximum de production primaire (consommation maximum de nitrate) et le maximum de chlorophylle associés au sommet de la nitracine sont généralement sous le gradient maximum de densité (fig. 10) et que le maximum de chlorophylle n'est pas le résultat d'une accumulation mécanique,

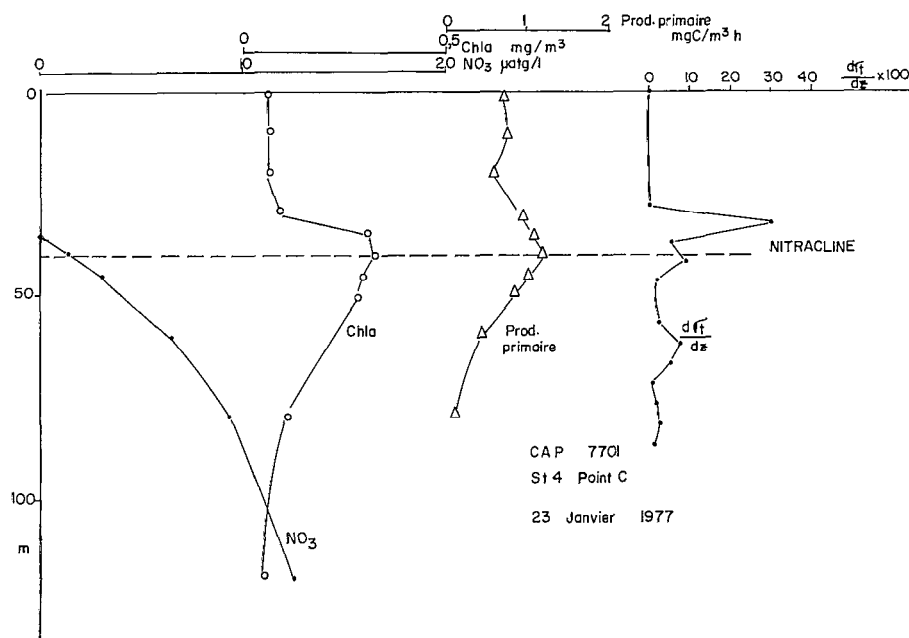


Fig. 10. — Distribution verticale en situation tropicale typique (saison chaude) à l'équateur : nitrate, chlorophylle a , production primaire et gradient vertical de densité. Les maximums de chlorophylle et de production primaire sont situés au sommet de la nitracline.

Vertical distribution at the equator in typical tropical situation (nitrate depleted surface layer): nitrate, Chla, primary production, vertical density gradient. The maximum of chlorophyll and primary production are located at the top of the nitracline.

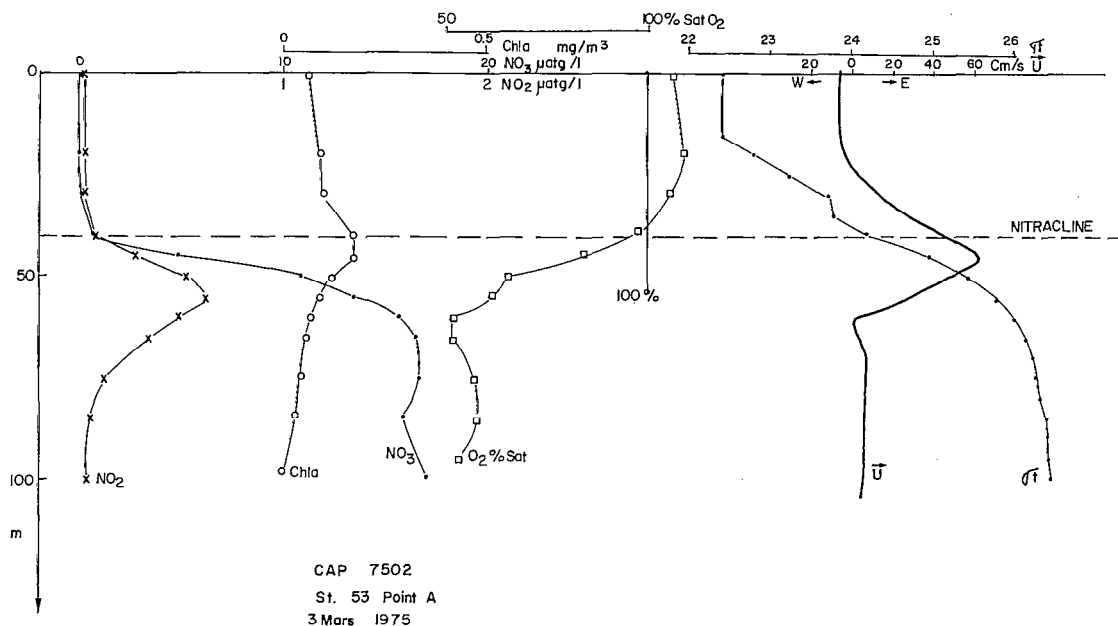


Fig. 11. — Distribution verticale en situation tropicale typique à l'équateur : nitrite, nitrate, Chla, pourcentage de saturation d'oxygène, composante E-W de la vitesse (U), densité. Le niveau 100 % de saturation d'oxygène et le sommet de la nitracline coïncident. Le maximum de nitrite est dans la nitracline. Le maximum de Chla est au cœur du courant de Lomonossov.

Vertical distribution at the equator in typical tropical situation (nitrate depleted surface layer): nitrite, nitrate, Chla, percent of oxygen saturation, E-W component of velocity (U), density. The 100 % oxygen saturation level and the top of the nitracline coincide. The nitrite maximum is in the nitracline. The Chla maximum is in the core of the equatorial undercurrent.

mais celui des processus photosynthétiques au niveau où le flux vertical de nitrate est maximum. On peut en conclure que dans la crête à 3° S où la production primaire est plus importante qu'à l'équateur, sous le gradient maximum de densité, le flux vertical de sels nutritifs est également plus important qu'il ne l'est à l'équateur.

Les mesures faites dans le courant de Lomonossov en situation tropicale typique au cours de ces campagnes montrent bien que la zone équatoriale n'est pas un cas particulier en dépit d'une structure dynamique qui, elle, est très particulière. La stratification en situations tropicales typiques (HERBLAND et VORTURIEZ, 1977 a) se retrouve dans le courant de Lomonossov : décalage entre nitracline et pycnocline, coïncidence du maximum de chlorophylle, du 100 % de saturation de l'oxygène et du maximum

de production primaire avec le sommet de la nitracline (fig. 10 et 11), association du maximum de nitrite avec la nitracline, si bien que sur les profils verticaux des paramètres de la production primaire et sur les valeurs intégrées de la production le courant de Lomonossov n'apporte aucune singularité même si le maximum de chlorophylle se trouve au cœur de ce courant (fig. 11). Cependant, la structure verticale du champ de courants intervient nécessairement sur le champ de densité qui, on l'a vu, règle la profondeur de la nitracline, niveau critique de la production. On constate que dans le courant de Lomonossov le sommet de la nitracline se trouve à des niveaux variables (fig. 12) : ainsi de janvier à mars 1975 ce niveau était dans le maximum de salinité proche du

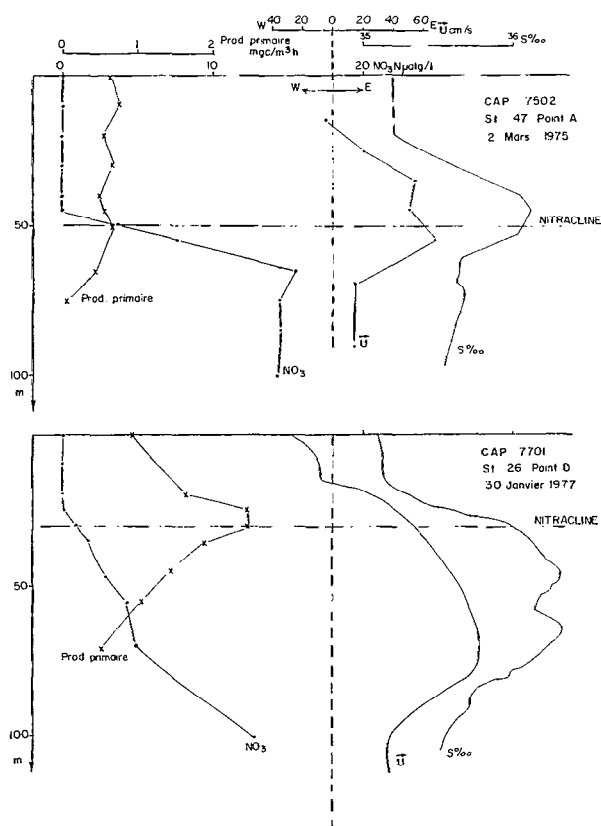


Fig. 12. — Distribution verticale de la production primaire et du nitrate dans le courant de Lomonossov en saison chaude.

Vertical distribution of primary production and nitrate during the warm season in the equatorial undercurrent.

Production primaire = Primary production

NO_3 = Nitrate

→

U = E-W component of velocity

$S_{\text{‰}}$ = Salinity

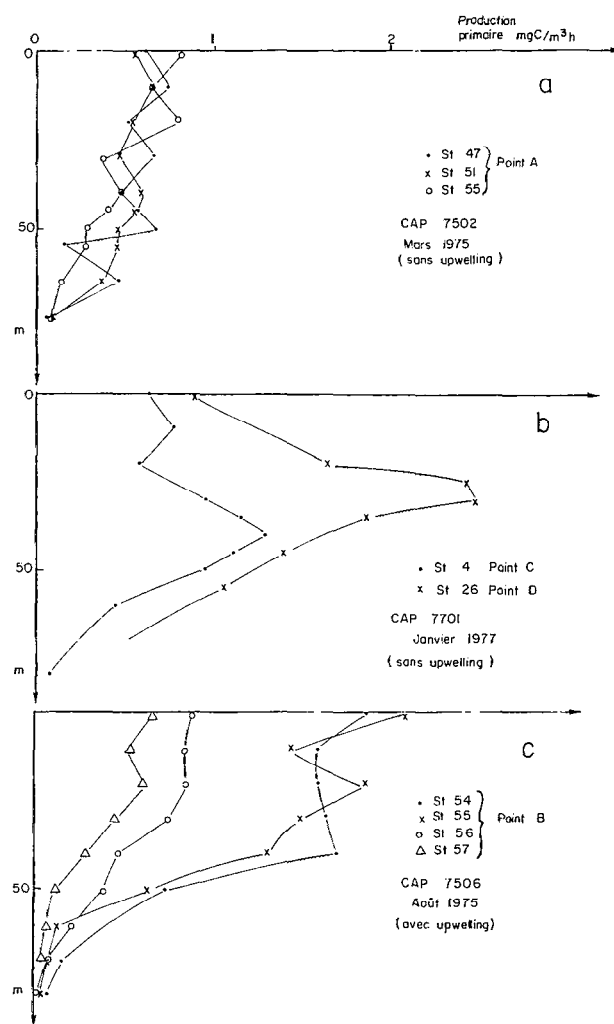


Fig. 13. — Distribution verticale de la production primaire à l'équateur en saison chaude (a, b), en saison d'upwelling (c).

Vertical distribution of primary production at the equator during the warm season (a, b) and the upwelling season (c).

maximum de vitesse et à une profondeur moyenne de 44 m alors qu'en janvier 1977 il se trouvait au-dessus à une profondeur moyenne de 30 m. Le sommet de la nitracline peut donc occuper une position variable et l'épuisement en nitrate de la couche de surface s'étend jusqu'au cœur du courant de Lomonossov en janvier-février 1975 alors qu'en janvier 1977 seules les couches supérieures du sous-courant sont épuisées en nitrate. Parallèlement aux variations de niveau de la nitracline la production primaire est nettement plus élevée en janvier 1977 qu'en mars 1975 (tabl. I et II), et le maximum de production primaire au sommet de la

nitracline apparaît en janvier 1977 avec la nitracline à 30 mètres alors qu'il n'apparaît pas en mars 1975 lorsque la nitracline est plus profonde (50 m) et la production plus faible (fig. 12 et 13).

Comparé aux autres situations tropicales typiques étudiées au cours des campagnes 7502 et 7506 (tabl. II), on constate que l'équateur proprement dit occupe dans l'échelle des valeurs de production une position très variable allant des zones de convergence aux dômes. Ces variations importantes sont sans doute liées à des différences de turbulence qui en définitive fixe la profondeur de la couche riche en sels nutritifs dans la couche euphotique. SEDİKH et

TABLEAU I

Production primaire équatoriale dans le courant de Lomonossov.

Equatorial primary production in the equatorial undercurrent.

	Campagne 7502 mars 1975 sans upwelling L = 0°30' S G = 4°30' W						Campagne 7701 janvier 1977 sans upwelling L = 0°13' S L = 0°29' S G = 3°09' W G = 4°00' W		Campagne 7506 août 1975 avec upwelling L = 0°30' S G = 4°30' W			
N° Station.....	47	49	51	53	55	57	4	26	54	55	56	57
Production primaire mgC/m ² .h...	37		36		32		56	98	90	82	41	24
Chla mg/m ²	15	15		11	11	12	16	15	19	20	22	16
Profondeur Nitracline (mètres)...	50	40	45	45	45	35	35	25	Le NO ₃ est en surface			

TABLEAU II

Comparaison de la production primaire moyenne dans diverses situations tropicales de l'Atlantique en février-mars 1975 et juillet-août 1975.

Comparison of the mean primary production in various "typical tropical situations" of the Atlantic Ocean in February-March 1975 and July-August 1975.

	SITUATION TROPICALE TYPIQUE					UPWELLING
	Dôme d'Angola février 1975 9°30' E 9°30' S	Convergence février 1975 11°10' S 5°20' W	Convergence juillet-août 1975 12° S 5°25' W	Équateur		Équateur août 1975 0°30' S 4°30' W
				0°30' S 4°30' W mars 1975	0°15-0°30' S 3°-4° W janv. 1977	
Profondeur Nitracline (mètre)....	22	75	85	44	30	0
Production primaire mgC/m ² .h....	70	38	16	35	75	60
Chlorophylle mg/m ²	16	12.7	8.6	12.8	15.5	19

LOUTCHKINA (1971) ont d'ailleurs noté une variation interannuelle très importante de la stabilité en saison chaude. Si en cette saison les mélanges verticaux à l'équateur sont insuffisants pour créer une situation d'upwelling ils sont cependant supérieurs à ceux des régions voisines. Ceci se traduit pas un enrichissement superficiel de la surface en chlorophylle à l'équateur (fig. 2) et un affaiblissement du maximum thermocline. La comparaison avec le dôme d'Angola étudié aussi en février 1975 (CAP 7502) et qui parmi les structures tropicales typiques compte parmi les plus riches est à cet égard significative. Bien que la production primaire soit deux fois plus élevée dans le dôme (70 mgC/m².h) qu'à l'équateur à la même époque (35 mgC/m².h) et que la chlorophylle soit aussi plus abondante (1,6 mg/m² dans le dôme contre 12,8 mg/m² à l'équateur) les valeurs de chlorophylle dans la couche homogène sont plus importantes à l'équateur (0,14 mg/m³) que dans le dôme (0,08 mg/m³).

4.2. Situation d'upwelling

Nous ne disposons pas dans ce cas de relation générale entre la structure hydrologique et la production primaire. Il est donc difficile de faire une étude complète de la production primaire alors que les seules mesures de production faites en cette saison le furent vers 0°30' S à la latitude du courant de Lomonossov (St. B).

Seule la chlorophylle peut donner une indication sur la distribution de cette production. Les fortes valeurs de chlorophylle s'étendent de 1°30' N à 4° S (fig. 2) indiquant vraisemblablement de fortes productions dans toute cette zone. Mais elle ne représente pas un système homogène : la dissymétrie observée dans la circulation méridienne se retrouve dans la distribution de la chlorophylle et l'on peut considérer trois systèmes différents : la convergence nord, de 1°30' N à l'équateur, l'upwelling actif de 0° à 1°30' S et la zone de transport advectif au sud de 1°30' S.

4.2.1. CONVERGENCE NORD (1°30' N à 0°)

Si l'on s'en tient à la définition donnée précédemment cette région correspond à une situation tropicale typique. Sa richesse en chlorophylle est due au fort maximum de subsurface (fig. 2 et 14). Elle présente cependant des anomalies. Ainsi, on observe un décalage important entre la nitracline et le maximum de chlorophylle et, par rapport à la profondeur du sommet de la nitracline (35 m), les valeurs de chlorophylle mesurées sont beaucoup plus fortes que

celles déduites de la relation établie par HERBLAND et VOITURIEZ (sous presse) pour les situations tropicales typiques :

$$\text{Chla}_i = -0,17 D_{\text{NO}_3} + 22,5 \quad (2) \quad \text{où}$$

Chla_i = Chlorophylle a intégrée sur la colonne d'eau exprimée en mg/m²

D_{NO_3} = Profondeur en mètre de la nitracline (niveau du premier échantillon contenant du nitrate).

Ainsi, à la station 5 de la campagne 7501 (fig. 2), la valeur de chlorophylle déduite de la relation (2) est

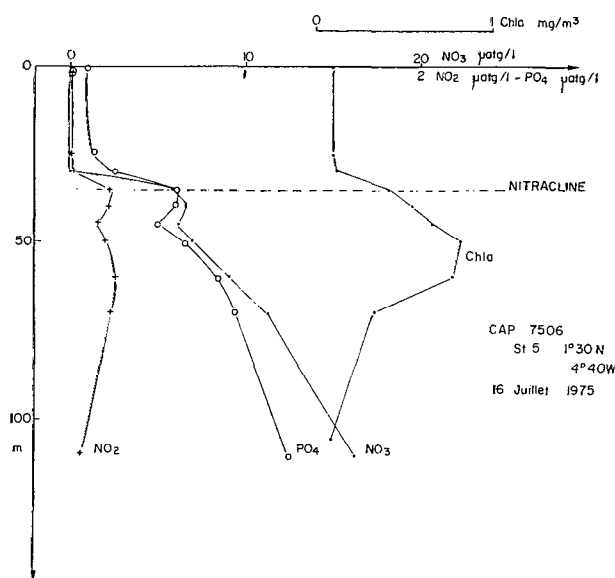


Fig. 14. — Saison d'upwelling : distribution verticale des paramètres dans la convergence nord.

Upwelling season : vertical distribution of parameters in the northern convergence (1°30' N).

de 17 mg/m² alors qu'en réalité la valeur mesurée est de 36 mg/m².

Ces anomalies sont la trace de la plongée des eaux de l'upwelling au niveau du front thermique qui matérialise la convergence nord. Elles sont à rapprocher de la distribution verticale des sels nutritifs : il apparaît un minimum proche du maximum de chlorophylle dans les courbes de silicate, phosphate, et nitrate et un double maximum de nitrite dont le plus profond est situé sous le maximum de chlorophylle. Cette structure à double nitracline et double maximum de nitrite suggère qu'il y a superposition de deux systèmes : le système profond pourrait correspondre à la plongée d'eaux de l'upwelling enrichies en chlorophylle et appauvries en sels nutritifs par les fortes productions de l'upwelling ; le système supé-

rieur correspondrait au système tropical typique où le maximum de chlorophylle qui devrait correspondre à la nitracine supérieure (35 m) serait masqué par le maximum profond issu des eaux productives de l'upwelling. Ceci montre la limite de validité des relations de HERBLAND et VOITURIEZ (sous presse): elles sont applicables seulement dans les structures stables

où les vitesses verticales sont faibles, elles excluent donc les convergences actives au même titre que les upwellings. Le taux de phaeophytine au niveau du maximum de chlorophylle confirme cette interprétation: c'est aux stations 4 et 5 de la convergence que l'on observe ses plus fortes valeurs (tabl. III).

TABLEAU III

Taux de Phaeophytine dans le maximum de chlorophylle entre 4° N et 5° S en juillet-août 1975.
Phaeophytin rate in the chlorophyll maximum between 4° N and 5° S in July-August 1975.

St.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Taux Phaeophytine %	42	40	48	51	54	35	42	37	41	43	42	44	35	33	35	49	48	50

Il est vraisemblable que dans cette convergence les fortes quantités de chlorophylle ne sont pas représentatives de la production primaire.

4.2.2. L'UPWELLING ACTIF (0° à 1°30' S)

Nous disposons, pour cette région, des mesures de production *in situ* faites au point fixe (St. B) pendant CAP 7506. Dans cette région où la turbulence forte est la cause présumée de l'enrichissement des couches de surface, l'essentiel de la production primaire se trouve dans les 40 premiers mètres (fig. 13). Sur les 4 stations faites, les valeurs de production varient beaucoup (de 24 à 90 mgC/m².h) sans que les valeurs de chlorophylle suivent une évolution parallèle (tabl. I).

Ces variations importantes n'ont pas trouvé d'explication satisfaisante à partir des données disponibles: il n'apparaît de variations ni dans les conditions hydrologiques, ni dans la structure des courants, ni dans la distribution des sels nutritifs, ni dans l'ensoleillement. Et cependant cette évolution est bien réelle et se retrouve dans l'activité hétérotrophe: l'assimilation du glucose est beaucoup plus importante à la station 57 (HERBLAND et VOITURIEZ, 1977 c) et dans la distribution du zooplancton qui est plus abondant à cette station (LE BORGNE, 1978). La comparaison des valeurs maximales de production mesurées en mars 1975, janvier 1977 et août 1975 (tabl. I) montre que les productions mesurées en période d'upwelling ne sont pas nécessairement plus fortes que celles mesurées en situation tropicale typique à nitracine peu profonde (St. 26 à 7701). D'ailleurs le rapport des valeurs de chlorophylle

entre août 1975 et janvier 1977 est seulement à l'équateur de 1.2. Les valeurs moyennes de production à l'équateur (60 mgC/m².h) sont plus faibles que dans le dôme d'Angola (tabl. II) où il n'y a pas d'upwelling au sens de CROMWELL et comparables à celles de TCHMIR 720 mgC/m².j en septembre 1975. Cette production relativement faible de l'upwelling équatorial alors que les sels nutritifs ne sont pas limitants a déjà été soulignée par SOROKIN *et al.* (1975) pour le Pacifique et VOITURIEZ et HISARD (1975) pour l'Atlantique. Ces derniers ont émis

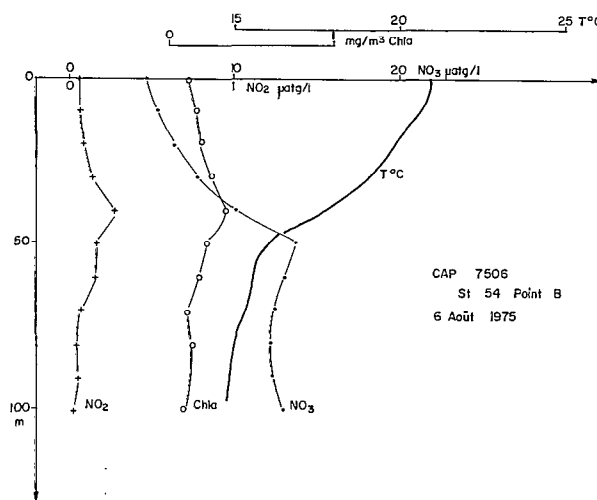


Fig. 15. — Saison d'upwelling: distribution verticale à l'équateur: nitrite, nitrate, Chla, température.

Upwelling season: vertical distribution at the equator: nitrite, nitrate, Chla, temperature.

l'hypothèse que la forte turbulence régnant à l'équateur en période d'upwelling contrariait le développement du phytoplancton. Ainsi le déséquilibre créé par l'upwelling équatorial, s'il favorise la production primaire par l'apport de sels nutritifs, la limiterait en contrepartie par l'instabilité créée.

En dépit de cette turbulence on observe une stratification verticale de certains paramètres. En particulier la chlorophylle et le nitrite présentent tous deux un très léger maximum (fig. 15). Le maximum de nitrite est associé à la nitracline exactement de la même manière que dans les situations tropicales typiques (VOITURIEZ et HERBLAND, 1977) et l'on peut penser qu'il définit ici aussi la partie de la zone euphotique où la lumière est l'élément limitant de la production. Le maximum de chlorophylle associé ici au maximum de nitrite serait alors lui aussi associé à des conditions limitantes de lumière et n'aurait pas la même signification que le maximum de chlorophylle observé dans les situations tropicales typiques, où il correspond au niveau de photosynthèse maximum.

4.2.3. LA ZONE DE TRANSPORT ADVECTIF 1°30' S À 5° S

Les eaux de l'upwelling qui font surface à l'équateur sont entraînées vers le sud en maintenant en surface une couche homogène riche en sels nutritifs et en chlorophylle au-dessus d'une couche à forte stabilité. Les conditions semblent donc favorables au développement du phytoplancton et à une production primaire importante. Mais en l'absence de mesures de production et de lumière il est difficile de conclure. On notera cependant que suivant LE BORGNE (1977) les biomasses maximales de zooplancton se trouvent également décalées vers le sud entre 1° S et 3° S. L'évolution de ces eaux apparaît sur la relation entre la chlorophylle et la fluorescence *in vivo* qui ici n'est pas linéaire contrairement à ce que l'on observe dans les autres régions de l'Atlantique tropical. Ceci résulterait d'une augmentation importante de la fluorescence *in vivo* soluble et traduit selon HERBLAND et VOITURIEZ (1977 b) la maturation des populations phytoplanctoniques.

Dans cette région il existe une importante couche de discontinuité au travers de laquelle les échanges verticaux ne sont pas plus importants qu'en janvier-février dans la crête thermique. La production dans la couche homogène n'est donc pas tributaire des apports de sels nutritifs de la couche profonde et l'essentiel de la production se développe dans la couche homogène. Le maximum de chlorophylle n'est pas dans la thermocline qui sépare une couche homogène riche en chlorophylle d'une couche profonde pauvre (fig. 16).

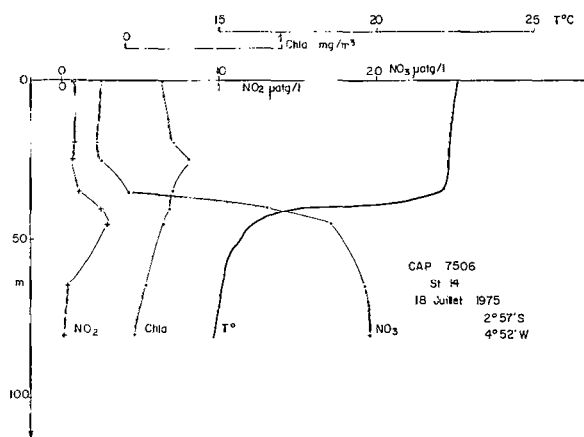


Fig. 16. — Saison d'upwelling : distribution verticale dans la zone de transport advectif au sud de l'équateur : nitrate, nitrite, Chlorophylle, température.

Upwelling season : vertical distribution of parameters south of the equator in the advective transport zone.

CONCLUSIONS

A la différence du Pacifique est où l'upwelling équatorial permanent enrichit toute l'année la couche de surface en sels nutritifs, on observe dans l'Atlantique est deux situations auxquelles correspondent deux types d'enrichissement différents : (1) la situation prédominante que l'on rencontre toute l'année sauf en été est caractérisée par la présence au sud de l'équateur (3° S) d'une crête thermoclinale stable où une couche homogène chaude épuisée en nitrate surmonte une pycnocline très marquée au travers de laquelle les échanges sont réduits ; (2) la situation d'upwelling en été est le résultat de l'augmentation des mélanges verticaux provoquée par l'accroissement du gradient vertical de vitesse dû à la remontée du courant de Lomonossov et à l'accélération du courant de surface. Les eaux froides et riches en sels nutritifs apparaissent alors en surface à l'équateur et s'étendent en direction de pôles. Elles s'écoulent librement vers le sud alors qu'au nord elles plongent très rapidement sous les eaux assez peu salées du golfe de Guinée.

A ces deux situations correspondent deux types de systèmes productifs. Le premier appartient à l'ensemble des situations dites « tropicales typiques » définies par l'existence d'une couche homogène où la concentration du nitrate est nulle. Dans de tels systèmes l'importance de la production primaire est déterminée par la profondeur du sommet de la nitracline. La profondeur de la nitracline est elle-même fixée par le niveau du gradient vertical maximum de densité qui forme une barrière à la diffusion des sels

nutritifs. C'est à ce niveau que la consommation de sels nutritifs par le phytoplancton est maximum et que s'établit le maximum de production primaire et de chlorophylle. On peut donc considérer ce niveau comme la source principale de phytoplancton. A ce type de situation correspond un maximum de production dans la crête thermique de 3° S. La distribution verticale caractéristique des situations tropicales typiques n'est pas modifiée en cette saison par le courant de Lomonossov, au sein duquel peut pourtant se situer ce niveau critique dont les variations de profondeur entraînent de grandes variations de la production primaire.

En été pendant la période d'upwelling lorsque sous l'action conjuguée du courant équatorial de surface

et du courant de Lomonossov la couche homogène est détruite à l'équateur, l'essentiel de la production primaire est situé dans les quarante premiers mètres avec des valeurs maximales en surface. En dépit des conditions plus favorables de sels nutritifs les valeurs mesurées de production primaire à l'équateur en août ne semblent pas toujours plus élevées qu'en janvier et atteignent 1 gC/m².j. Le rapport des valeurs de chlorophylle peut ne pas dépasser 1.2. Cette faible différence entre les deux saisons peut s'expliquer par l'importance des mélanges turbulents qui contrarient le développement du phytoplancton.

Manuscrit reçu au Service des Publications le 11 janvier 1978.

BIBLIOGRAPHIE

- CORCORAN (E. F.) et MAHNKEN (C. V. W.), 1969. — Productivity of the Tropical Atlantic Ocean. Proceedings of the symposium on the oceanography and fisheries resources of the tropical Atlantic. Abidjan, 20-28 October 1966.
- CROMWELL (T.), 1953. — Circulation in a meridional plane in the Central Equatorial Pacific. *J. Mar. Res.*, 12 (2) : 196-213.
- CROMWELL (T.), 1958. — Thermocline topography, horizontal currents and « Ridging » in the eastern tropical Pacific. *Inter American Tropical Tuna Commission Bulletin*, 3, (3) : 135-164.
- DEFANT (A.), 1936. — Die Troposphäre des Atlantischen Ozean. Deutsche Atl. Exped. « Meteor » 1925-1927. *Wiss. Erg.*, 6, 1 (3) : 289-411.
- HERBLAND (A.) et VOITURIEZ (B.), 1977 a. — 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.), 1977 b. — Relation chlorophylle *a* fluorescence *in vivo* dans l'Atlantique tropical. Influence de la structure hydrologique. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. XV, n° 1 : 67-77.
- HERBLAND (A.) et VOITURIEZ (B.), 1977 c. — Étude de la production pélagique de la zone équatoriale de l'Atlantique à 4°W. V — Observations sur l'activité hétérotrophe. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. XV, n° 4 : 375-387.
- HERBLAND (A.) et VOITURIEZ (B.) (sous presse). — The use of the vertical distribution of temperature, oxygen, and nutrients for estimating chlorophyll and primary production in the tropical Atlantic Ocean.
- HISARD (Ph.), CITEAU (J.) et VOITURIEZ (B.), 1977. — Equatorial undercurrent influences on enrichment processes of upper waters in the Atlantic Ocean. Report of the International Workshop on the Gate Equatorial Experiment (Miami, 28 February to 10 March 1977).
- KOLESNIKOV (A. G.), 1973. — Equalant 1 and Equalant 2 oceanographic Atlas. Vol. 1 Physical Oceanography. UNESCO Paris.
- LE BORGNE (R.), 1977. — Étude de la production pélagique de la zone équatoriale de l'Atlantique à 4°W. II — Biomasses et peuplements du zooplancton. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. XV, n° 4 : 333-349.
- LEMASSON (L.) et REBERT (J. P.), 1973. — Circulation dans la partie orientale de l'Atlantique sud. *Doc. scient. Centre Rech. Océanogr.* Abidjan, IV (1) : 91-124.
- MAZEIKA (P. A.), 1968 a. — Serial Atlas of the marine environment. Folio 16. Mean Monthly Sea Surface Temperatures and Zonal Anomalies of the Tropical Atlantic. American Geographical Society.
- MAZEIKA (P. A.), 1968 b. — Thermal domes in the eastern tropical Atlantic Ocean. *Limnol. Oceanogr.*, 12 (3) : 537-539.
- SOROKIN (Y. I.), SOUKHANOVA (I. N.), KONOVLEBA (G. V.) et PABELIEVA (E. V.), 1975. — Production primaire et phytoplancton de la divergence équatoriale du Pacifique oriental. Travaux de l'Institut Océanographique SHIRSHOV de l'Académie des Sciences de l'URSS. Tome 102. Traduit par H. ROTSCHI et Ph. HISARD.
- SEDIKH (K. A.) et LOUTOCHKINA (B. N.), 1971. — Aspects hydrologiques de la formation de la zone équatoriale productive du golfe de Guinée. in Les zones productives de l'océan Atlantique Équatorial et les conditions de leur formation. Travaux AtlantNIRO, vol. XXXVII, pp. 31-80. Kaliningrad. Traduit par H. ROTSCHI.
- STEEMAN-NIELSEN (E.), 1952. — The use of radioactive carbon for measuring organic production. in The Sea. *J. Cons. Int. Explor. Mer*, 18 (2) : 117-140.

- STRETTA (J. M.), 1975. — Biomasses du phytoplancton et du zooplancton dans l'Atlantique tropical le long du méridien 10° W. (Résultats de la campagne CAPRICORNE 7314). *Doc. Scient. Centre Rech. Océanogr.* Abidjan, VI (1) : 83-96.
- TCHMIR (V. D.), 1971. — Production primaire en Atlantique Équatorial. in Les zones productives de l'océan Atlantique Équatorial et les conditions de leur formation. Travaux AtlantNIRO, vol. XXXVII, pp. 175-190. Kaliningrad. Traduit par H. Rotsch.
- VOITURIEZ (B.) et DANDONNEAU (Y.), 1974. — Relations entre la structure thermique, la production primaire et la régénération des sels nutritifs dans le dome de Guinée. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. XII (4) : 241-255.
- VOITURIEZ (B.) et HISARD (Ph.), 1975. — Nutrient enrichment in the equatorial upwelling : a comparison between the Atlantic and the Pacific Oceans. Third International Symposium of upwelling Ecosystems. Kiel, August 25-28, 1975.
- 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.
- VOITURIEZ (B.) (sous presse). — The use of the salinity maximum of the equatorial undercurrent for estimating nutrient enrichment and primary production of the equatorial upwelling in the Gulf of Guinea at 5° W.
- WATHEY (B.), 1975. — Equatorial upwelling originality (Pacific Ocean). Pacific Science Association : 13th Pacific Science Congress Record of Proceeding vol. 1. University of British Columbia, Vancouver B.C. Canada.
- WYRTKI (K.), 1964. — Upwelling in the Costa Rica Dome. *Fishery Bulletin*, 63 (2) : 355-372.