

**La production primaire  
dans les structures hydrologiques  
de la divergence équatoriale  
en saison d'upwelling**  
(campagne CIPREA I)

Monique MINAS (1), Alain HERBLAND (2)  
et Arlette RAMADE (1)

RÉSUMÉ

*Le système de production de la divergence équatoriale de l'Atlantique-est en été, ressort à deux modes principaux : — l'upwelling, entre 1°30' et 4°30' S, variable en intensité et en emplacement, présente des taux intégrés journaliers de production variant entre 300 et 1 400 mgC ; l'essentiel de la production se situe dans la couche superficielle, où les sels nutritifs sont en abondance ; — le système à deux couches (ou système tropical typique), vers le nord à partir de l'Équateur, avec une gamme de production de 500 à 1 700 mgC.m<sup>2</sup>.j est en moyenne plus productif que l'upwelling, et les concentrations en biomasse (chlorophylle a) y sont sensiblement plus élevées ; production et chlorophylle sont maxima dans la nitracline, où la forte stabilité favorise le développement phytoplanctonique ; -- une situation intermédiaire peut être définie entre les deux systèmes précédents, de part et d'autre de la zone-source de la remontée (500 à 1 500 mgC.m<sup>2</sup>.j).*

*Les rapports avec les caractéristiques hydrologiques sont examinés pour chaque type de situation.*

MOTS-CLÉS : Production primaire — Chlorophylle a — Nitrate — Upwelling — Équateur.

ABSTRACT

PRIMARY PRODUCTION AT THE EQUATORIAL DIVERGENCE DURING THE UPWELLING SEASON (CIPREA I CRUISE)

*During the summer, the production system of the eastern Atlantic equatorial divergence is under two main types : — the upwelling, intensity and location-variable, positioned between 1°30' and 4°30' S, exhibits daily integrated production rates between 300 and 1 400 mgC ; the main part of production is located in the upper layer, where nutrients are abundant ; — the two-layer system (or "typical tropical system"), from the Equator toward the North, with a production range of 500 to 1 700 mgC.m<sup>2</sup>.d is, on the average, more productive than the upwelling, and the biomass concentrations (chlorophyll a) are here sensibly higher ; primary production and chlorophyll a are maximum in the nitracline, where the high stability promotes phytoplanktonic development ; — an intermediate situation can be defined between the two previous systems, on each side of the upwelling center (500 to 1 500 mgC.m<sup>2</sup>.d).*

*Relationships with hydrological features are examined for each system.*

KEY WORDS : Primary production — Chlorophyll a — Nitrate — Upwelling — Equator.

(1) Faculté des Sciences de Luminy, case 902, 13288 Marseille Cedex 9, France.

(2) Centre de Recherches Océanographiques de Dakar-Thiaroye, B.P. 2241, Dakar, Sénégal.

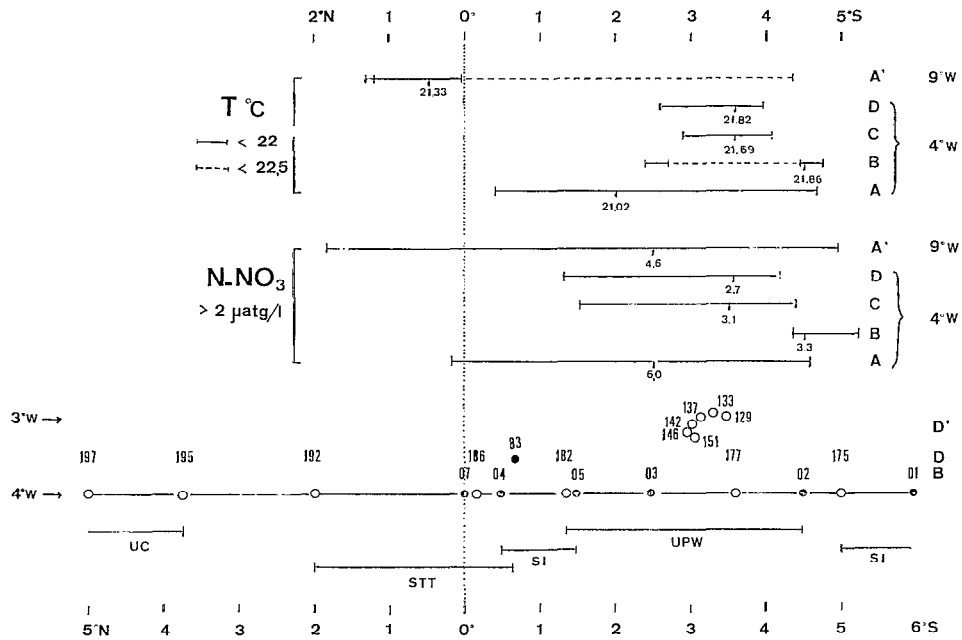


FIG. 1. — Représentation schématique de :

— *partie supérieure de la figure* : déplacements et extension de la zone d'affleurement au cours des 4 radiales à 4° W et de la radiale à 9° W, lors de la campagne CIPREA I, en août-sept. 1978 ; emplacements et valeurs superficielles du maximum de nitrate et du minimum de température observés

A-A' : sections du 3 au 11 août (4 et 9° W)

B : sections du 12 au 23 août (4° W)

C : sections du 31 août au 3 sept. (4° W)

D : section du 4 au 12 sept. (4° W)

D' : expérience « bouées dérivantes » du 6 au 11 septembre

— *partie inférieure de la figure* : stations « production primaire » ( $^{14}\text{C}$ ) ; délimitation des différentes situations rencontrées : UPW, upwelling — STT, système tropical typique — SI, situation intermédiaire — UC, upwelling côtier

— *Top* : shifting and extension of the upwelling on the 4 legs at 4° W and on the leg at 9° W, during CIPREA I, aug.-sept. 1978 ; positions and surface values of the nitrate maximum and temperature minimum

A-A' : transects 3/11 aug. (4 and 9° W)

B : transects 12/23 aug. (4° W)

C : transects 31 aug./3 sept. (4° W)

D : transec 4/12 sept. (4° W)

D' : drift buoy experiment, 6/11 sept.

— *Bottom* : primary production stations ( $^{14}\text{C}$ ) ; different situations observed : UPW, upwelling ; STT, typical tropical system ; SI, intermediate situation ; UC, coastal upwelling

La campagne CIPREA I d'août-septembre 1978 a été effectuée à l'époque de l'année qualifiée de « saison froide » (VOITURIEZ et HERBLAND, 1977, 1978) ; durant cette période, il s'établit à l'équateur une situation de type upwelling, caractérisée par un refroidissement superficiel accompagné d'un enrichissement en sels nutritifs. Parmi les explications les plus récentes de la formation de cet upwelling, divers travaux (HISARD *et al.*, 1977 ; VOITURIEZ et HERBLAND, 1977) proposaient l'hypothèse de l'accroissement des mélanges verticaux pendant l'hiver austral, accroissement lié à la

remontée du courant de Lomonosov et au renforcement du courant équatorial de surface.

Pendant la campagne CIPREA I, du 4 au 11 août deux sections nord-sud ont été effectuées simultanément à 4° W et à 9° W, cette dernière longitude correspondant en principe à l'immersion minimale du courant de Lomonosov. Sur la radiale à 4° W, 18 stations de mesure de la production primaire (méthode au  $^{14}\text{C}$ ) ont été occupées du 12 au 23 août, puis une section effectuée du 31 août au 3 septembre et, à nouveau du 4 au 12 septembre, 7 stations de mesure de production primaire (fig. 1). Du 6 au

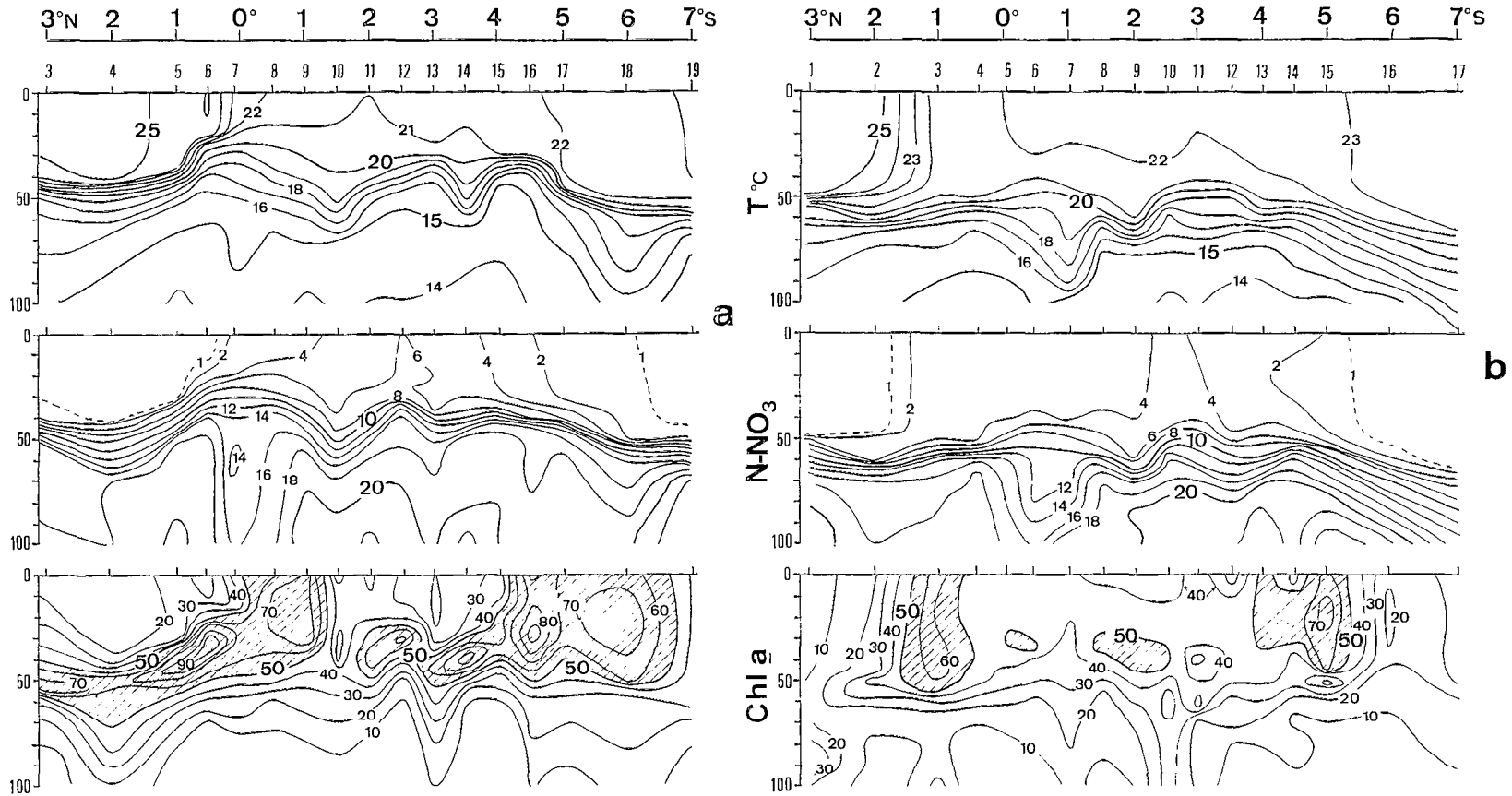


FIG. 2. — Distributions de la température (°C), du nitrate ( $\mu\text{alg.l}^{-1}$ ) et de la chlorophylle a ( $\text{mg.m}^{-3}$ ) le long des radiales :  
 a — à 4° W (section A de la figure 1) ; b — à 9° W (section A' de la figure 1)  
 Distribution of temperature (°C), nitrate ( $\mu\text{alg. l}^{-1}$ ) and chlorophyll a ( $\text{mg. m}^{-3}$ ) along the legs : a — at 4° W (transect A of fig. 1) ;  
 b — at 9° W (transect A' of fig. 1)

11 septembre, 6 stations supplémentaires de production ont été occupées, en suivant des bouées dérivantes dans la zone de remontée maximale (fig. 1; VOITURIEZ, 1980).

#### VARIATIONS SPATIO-TEMPORELLES DE LA RÉSURGENCE

— La figure 1 propose une représentation schématique de la zone d'affleurement lors des 4 sections de la radiale à 4° W et de la radiale à 9° W; elle appelle quelques remarques :

- l'upwelling présente des dimensions importantes, la zone de minimum thermique s'étendant grosso modo entre 1° N et 5° S, donc à une latitude plus méridionale que celle du courant de Lomonosov, généralement observé vers 0°30' S;

- le minimum thermique est toujours associé à des valeurs maxima de sels nutritifs, sauf à 9° W où il est nettement décalé vers le nord, à 0°30' N;

- l'axe de la remontée peut se déplacer sensiblement dans le sens nord-sud (2° à 4°30' S);

- il n'a pas été retrouvé aux 3 sections suivantes (B, C, D), les valeurs élevées de nitrate de la première radiale (A).

— Sur les figures 2 a et 2 b ont été portées les distributions, à 4° W et 9° W, des température, nitrate et chlorophylle *a*. Ces deux radiales ont été effectuées simultanément, entre le 3 et le 11 août.

L'axe de la remontée (emplacement du maximum de nitrate) est à 2°30' S sur les deux radiales et il est associé, à 9° W comme à 4° W, non au courant équatorial de surface et au courant de Lomonosov (VOITURIEZ *et al.*, 1982), mais à une remontée méridionale de courant est qui sépare en deux branches le courant équatorial de surface (YANG, 1980).

Les positions de la thermocline et de la nitracline présentent un décalage vers le bas à 9° W, de l'ordre d'une vingtaine de mètres, avec des gradients plus exprimés; enfoncement et resserrement des structures hydrologiques, indices d'un upwelling moins actif qu'à 4° W, se traduisent dans la distribution de la chlorophylle; si celle-ci répond au schéma général bien connu des grands upwellings côtiers, avec des valeurs relativement plus faibles dans l'axe de la résurgence, les concentrations sont généralement moins élevées à 9° W, et l'on n'observe pas le noyau associé à la nitracline, et aux eaux froides plongeant au nord à partir du front thermique équatorial, sous la couche épuisée en sels nutritifs.

La figure 3 montre la corrélation, hautement significative, entre la profondeur du maximum de chlorophylle et la profondeur du sommet de la nitracline (point d'inflexion dans le profil vertical du nitrate). La relation est à peu près identique

pour le nitrate et la température, et l'origine sur l'axe des ordonnées des droites de régression indique une vingtaine de mètres de décalage vers le bas du

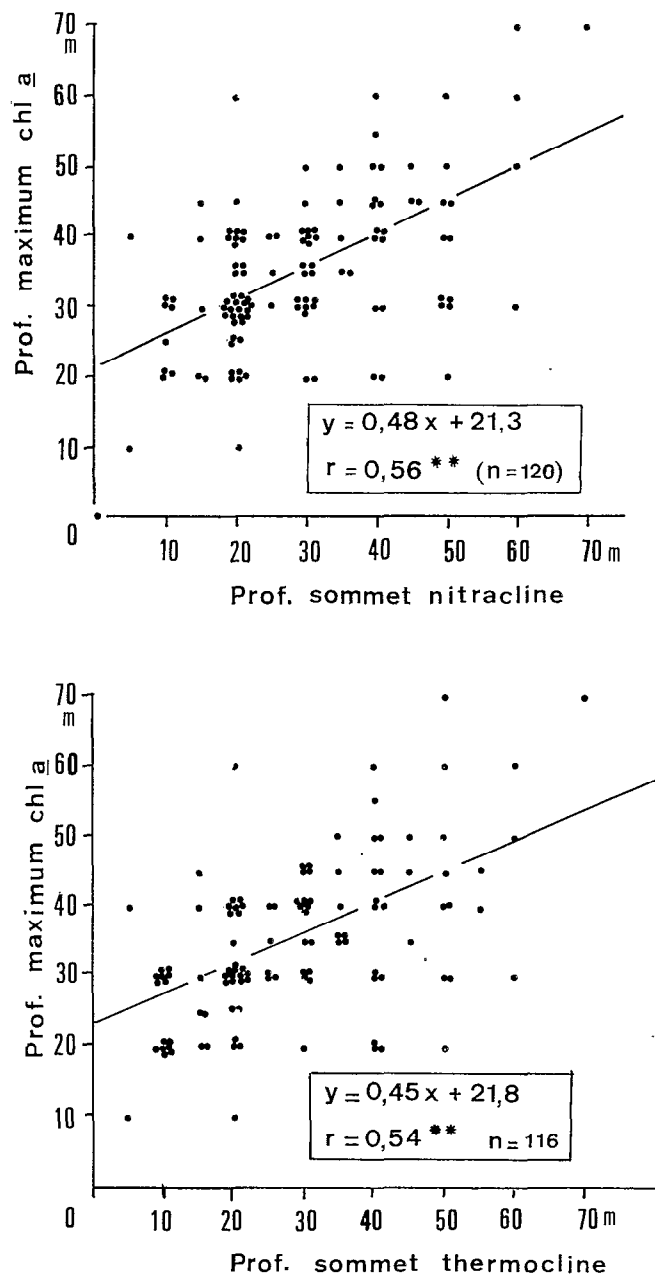


FIG. 3. — Relations entre la profondeur du maximum de chlorophylle *a* et celles du sommet de la nitracline (en haut) et de la thermocline (en bas) tops, for all CIPREA I stations (Suroît and Capricorne)

Relations between chlorophyll *a* maximum depth and nitracline (top) and thermocline (bottom) tops, for all CIPREA I stations (Suroît and Capricorne)

TABLEAU I

Stations de mesure de la production primaire (méthode au  $^{14}\text{C}$ ), lors de la campagne CIPREA I. Caractéristiques des eaux de surface (température, nitrate). Valeurs intégrées de la production et de la chlorophylle *a*; valeur du maximum de chlorophylle *a*.

UPW : système d'upwelling; STT : système tropical typique; SI : situation intermédiaire; UC : upwelling côtier

Primary production measurement stations ( $^{14}\text{C}$  method) during CIPREA I cruise. Characteristics of surface waters (temperature, nitrate). Integrated values of the production and chlorophyll *a*; maximum value of chlorophyll *a*. UPW: upwelling system; STT: typical tropical system; SI: intermediate situation; UC: coastal upwelling

Stations 4°W	T°C surf.	NO <sub>3</sub> surf. µatg/L	type d'eaux	Chlorophylle <i>a</i>		P.P. intégré mgC/m <sup>2</sup> /J
				max. mg/m <sup>3</sup>	intégré mg/m <sup>2</sup>	
123	22,64	1,05		0,62	31,45	660
125 P-01 (6°S)	22,62	0,92	SI	0,55	23,40	551
127	22,61	0,72		0,58	26,85	570
19	21,80	2,90		0,34	13,50	674
33 P-02 (4°30S)	21,92	3,70	UPW	0,34	15,90	309
50	22,30	3,30		0,38	17,88	309
129	21,99	1,78		0,84	43,30	912
131 P-03 (2°30S)	21,75	1,97	UPW	0,44	16,15	1100
133	21,90	1,76		0,77	28,60	1250
87	23,23	0,30		0,90	39,88	647
92 P-05 (1°30S)	23,03	0,40	SI	0,45	22,10	608
114	23,11	0,60		1,51	51,78	613
83 (0°40S) (3°30W)	24,95	0	STT	0,46	15,73	515
145	23,80	0,86		0,68	29,48	1326
147 P-04 (0°30S)	23,50	1,09	SI	0,69	31,22	1314
149	23,00	1,27		0,84	32,80	1534
120 P-07 (0°)	24,83	0		1,71	56,25	1225
124	24,70	0	STT	2,11	41,78	1014
175 (5°S)	22,44	1,19	SI	0,45	16,35	950
177 (3°30S)	21,82	2,70	UPW	0,74	23,35	1416
182 (1°20S)	22,73	1,96	UPW	0,21	8,80	1012
186 (0°)	24,72	0,07	STT	-	-	1166
192 (2°N)	25,22	0,05	STT	-	-	1660
195 (3°40N)	23,71	0,02	UC	0,63	21,68	1371
197 (5°N)	22,54	0	UC	2,32	38,48	2167
129 (3°30S) (3°W)	21,83	2,50	UPW	0,45	22,18	361
133	22,01	2,30	"	0,27	9,98	1127
137	22,03	2,20	"	0,29	13,28	1388
142	22,16	2,10	"	0,31	14,20	1284
146	22,25	1,90	"	0,41	17,73	1241
151 (3°S) (3°15W)	22,33	1,80	"	0,33	13,43	1110

maximum de chlorophylle par rapport aux sommets des gradients, traduisant le fait que c'est au sein des structures nitra- et thermoclinales, dans la couche de plus forte stabilité, que se développe le noyau chlorophyllien, quelle que soit la concentration du

nitrate dans la couche homogène (la moyenne de concentration en nitrate au niveau du maximum de chlorophylle est — toutes stations confondues Suroît + Capricorne — de  $6,7 \mu\text{atg.l}^{-1}$ , pour une température de  $20,6^\circ\text{C}$ ).

## DISTRIBUTION DE LA PRODUCTION PRIMAIRE DANS LES STRUCTURES HYDROLOGIQUES

Si l'on prend comme critère les structures hydrologiques, et en considérant la totalité des mesures de production, trois situations peuvent être définies, auxquelles correspondent certaines caractéristiques de la production primaire (fig. 1, tabl. I) :

— La situation d'upwelling, dans laquelle, en surface, la température varie entre 21,8 et 22,3 °C, le nitrate présentant des concentrations de l'ordre de 2  $\mu\text{atg.l}^{-1}$  ou plus. Comme c'est le cas général dans les upwellings, dans cette zone-source, les productions croissent quand le nitrate décroît, et une relation hautement significative lie ces deux facteurs (fig. 4). Les valeurs intégrées de production varient entre 300 et 1 400  $\text{mgC.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ , les profils verticaux présentant la forme classique généralement rencontrée dans les masses d'eaux non stratifiées, avec maximum superficiel, et décroissance régulière en fonction de la profondeur (fig. 5 a).

— La situation tropicale typique, au nord de l'équateur, avec le système à deux couches, la couche supérieure homogène étant dépourvue de sels nutritifs et présentant des températures élevées, de l'ordre de 25 °C. Avec des taux intégrés variant de 500 à 1 700  $\text{mgC.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ , ces eaux, comme l'ont constaté d'autres auteurs (SLAWYK, 1980, VOITURIEZ *et al.*, 1982), se présentent comme aussi et même plus productives que le système d'upwelling, grâce à l'existence de l'important maximum (40 à 50  $\text{mgC.m}^{-3}.\text{j}^{-1}$ ) associé au sommet de la nitracline (fig. 5 b).

Bien que la couche de surface y soit totalement épuisée en nitrate, les stations 195 et 197 n'entrent manifestement pas dans ce type de situation : températures de surface inférieures à 24 et 23° C, maximum de production superficiel ; l'importance même de ce maximum (270  $\text{mgC.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$  à la station 197) ainsi que la remontée et le resserrement de la nitracline (l'isoplethe de 12  $\mu\text{atg.l}^{-1}$ , habituellement rencontrée entre 40 et 60 mètres dans la zone d'upwelling se trouve ici à moins de 10 et 20 mètres : fig. 5c) suggèrent plutôt qu'une remontée importante a affecté la zone côtière d'Abidjan, induisant un bloom phytoplanctonique de grande intensité. Dans ce cas, ces deux stations appartiennent effectivement au système d'upwelling côtier qui vient de présenter un mouvement pulsionnel particulièrement actif, et déjà en voie de régression (disparition du nitrate en surface, productions élevées, nitracline reformée, à fort gradient).

— Une situation intermédiaire entre les systèmes d'upwelling et tropical typique, dans laquelle le nitrate en surface varie entre 0,3 et 1,2  $\mu\text{atg.l}^{-1}$ , la température entre 22,6 et 23,8 °C. Dans cette zone, les taux intégrés de production décroissent avec la quantité de nitrate disponible dans la couche euphotique (fig. 4) ; les valeurs se répartissent dans une gamme de 600 à 1 500  $\text{mgC.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$  ; les profils

verticaux évoluent, en fonction des concentrations décroissantes en nitrate superficiel, depuis la forme « milieu non stratifié » (fig. 5 d) jusqu'à une forme intermédiaire avec le système tropical, avec apparition de maxima secondaires profonds (fig. 5 e).

Une remarque s'impose : quel que soit le système considéré, la plage de variation des productions

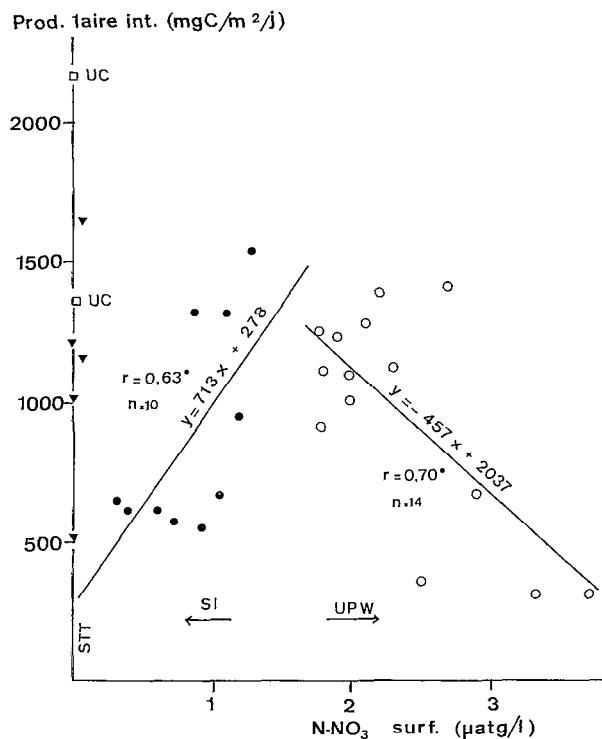


FIG. 4. — Relation entre le taux intégré de production ( $^{14}\text{C}$ ) et la valeur du nitrate de surface ; trois zones s'individualisent : — la zone d'upwelling où les eaux-sources, riches en sels nutritifs, présentent des taux de production bas et où la consommation du nitrate s'accompagne d'une augmentation de la production (UPW — cercles ouverts) ; — une zone intermédiaire où la production devient fonction de la quantité de nitrate disponible dans la couche euphotique (SI — points noirs) ; — une zone où prévaut le système tropical typique, et où les taux de production sont fonction de l'importance du maximum profond (STT — triangles noirs), — deux stations de mesure (UC — carrés ouverts) relèvent de l'upwelling côtier d'Abidjan

Relation between integrated rate of production ( $^{14}\text{C}$ ) and surface nitrate value ; three zones : — upwelling, in which new waters, with high nutrient content, show low production rate and in which nitrate consumption increases with production (UPW — open circles) ; — intermediate zone in which production becomes a function of the nitrate available in the euphotic layer (SI — black dots) ; — zone characteristic of the typical tropical system, in which production rate is a function of the deep maximum (STT — black triangles). Furthermore, two stations belong to the Abidjan coastal upwelling (UC — open squares)

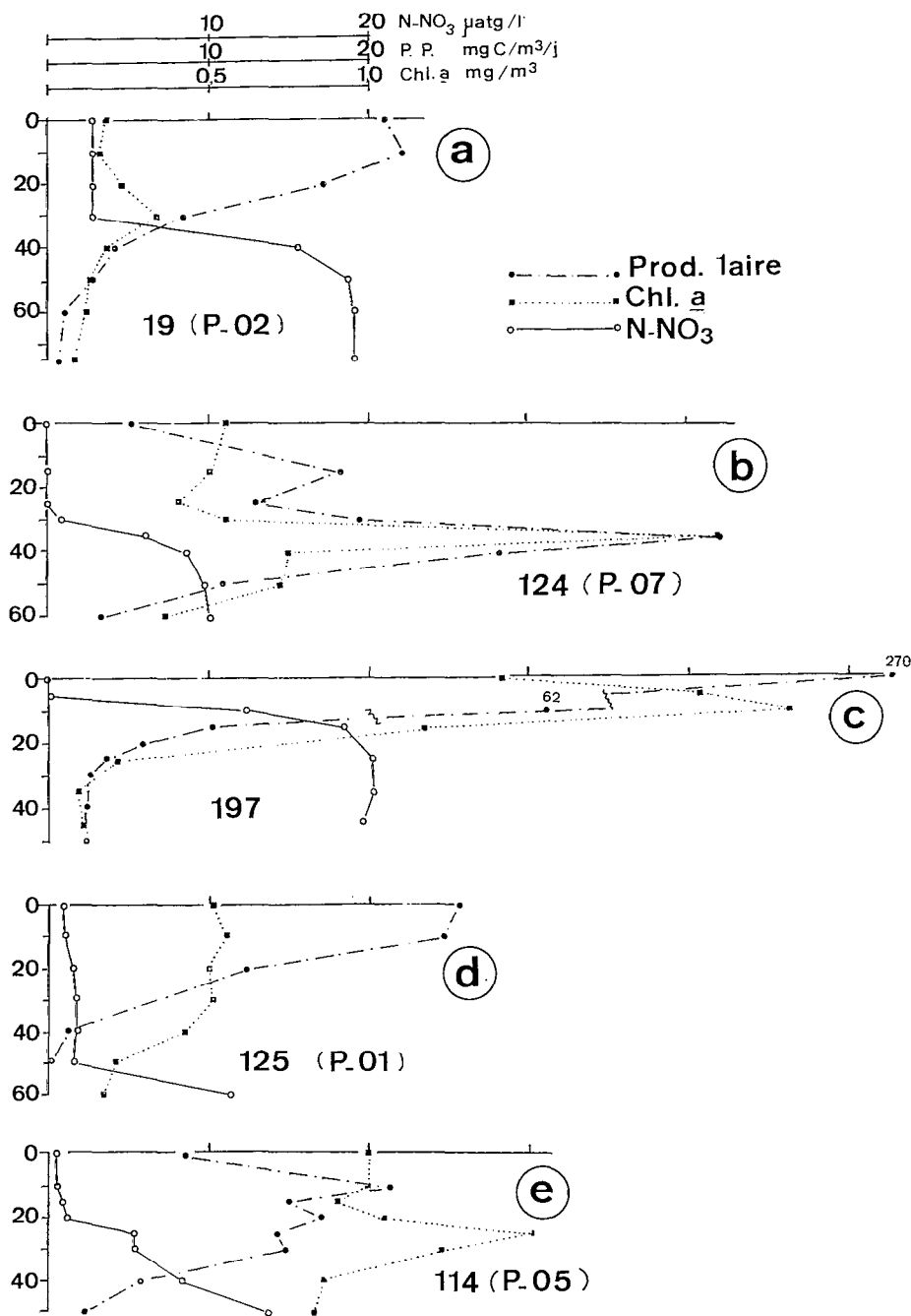


FIG. 5. — Profils verticaux de production primaire (<sup>14</sup>C), de chlorophylle a et de nitrate : a : situation d'upwelling — b : système tropical typique — c : système d'upwelling côtier — d et e : situation intermédiaire

Primary production (<sup>14</sup>C), chlorophyll a and nitrate vertical profiles : a : upwelling system — b : typical tropical system — c : coastal upwelling system — d and e : intermediate situation

intégrées est approximativement la même; toutefois, si l'on établit des moyennes (tabl. II), le système tropical apparaît comme aussi, sinon plus productif

que les autres systèmes. L'observation de VOITURIEZ *et al.* (1982) selon laquelle c'est en saison chaude, donc dans le système tropical typique,

TABLEAU II

Moyennes des production primaire et chlorophylle *a* intégrées et des maxima de chlorophylle *a*, pour les différents types d'eaux, UPW : système d'upwelling ; STT : système tropical typique ; SI : situation intermédiaire

*Primary production and chlorophyll a integrated means and chlorophyll a maxima, for the different waters. UPW : upwelling system ; STT : typical tropical system ; SI : intermediate situation*

Type d'eaux	Chlorophylle <i>a</i>		P.P. mgC/m <sup>2</sup> /J
	max. mg/m <sup>3</sup>	intégré mg/m <sup>2</sup>	
UPW	0,44	18,4	964
STT	1,43	37,9	1116
SI	0,71	30,5	877

que sont mesurées les plus fortes productions, est donc également valable dans le cas présent, pour une zone où coexistent les deux systèmes simultanément (1).

Si les moyennes de production intégrée ne montrent pas de différence significative entre le système d'upwelling et la situation intermédiaire, la différence sensible dans les moyennes de chlorophylle intégrée et de maximum de chlorophylle traduit parfaitement l'effet cumulatif lié à la notion de biomasse.

#### ÉVOLUTION DES DISTRIBUTIONS LE LONG DE LA RADIALE A 4° W (SECTIONS B ET D)

Les figures 6 a et 6 b présentent les distributions de la production et du nitrate lors de deux sections à 4° W, à une quinzaine de jours d'intervalle. Comme le montrait la figure 1, la zone de remontée maximale s'est notablement déplacée vers le nord lors de la seconde section. La nitracline, bien que plus proche de la surface d'une vingtaine de mètres dans la région centrale de l'upwelling, présente un gradient plus établi, permettant de penser que l'upwelling a cessé d'être actif et se trouve en phase de régression. Le schéma de distribution de la production corrobore cette hypothèse : le taux élevé mesuré à la station 177, la présence à 20 mètres d'un maximum bien individualisé au niveau du sommet de la nitracline, les concentrations relativement importantes en chlorophylle *a* et surtout en phaeophytine, indiquent qu'il s'agit plutôt d'une phase de fin de remontée (phase de consommation des sels nutritifs avec augmentation de la production).

On peut remarquer que des observations effectuées sur une seule radiale (fig. 6b, en l'occurrence) auraient pu conduire à une interprétation erronée (emplacement du maximum de production au niveau du maximum apparent de remontée) ; la première radiale (fig. 6a), permet de retracer l'« histoire » du système, et de corriger la relation apparente.

Sur l'ensemble de la section, l'enrichissement général en nitrate lors de la radiale D, se traduit par un accroissement de l'épaisseur de la couche productive et une augmentation générale des taux de production (tabl. I). On peut avancer l'hypothèse que, durant le laps de temps qui a séparé les deux sections de la radiale à 4° W, a pris place une remontée de forte intensité, telle par exemple celle observée lors de la radiale A (fig. 1), et que lorsqu'a été effectuée la radiale D, on était en présence des vestiges d'une telle remontée.

#### NOTION DE VARIABILITÉ

Ainsi constate-t-on, et on l'avait vu plus haut, que l'intensité de la résurgence équatoriale définie en termes de température et nitrate, est susceptible de variations notables à la fois dans l'espace (fig. 2) et dans le temps (fig. 1). La figure 2 montre en outre que, corrélativement, la biomasse peut présenter des fluctuations importantes, tant en concentration que dans sa distribution au sein des structures hydrochimiques.

A cette variabilité générale, d'ailleurs commune à toutes les zones de remontée, upwellings ou dômes, et liée à la dynamique particulière du système considéré (vents et courants), s'ajoute une variabilité à plus petite échelle, perceptible dans la modification à court terme ou à court espace, des caractéristiques physico-chimiques et biologiques.

La station longue durée P-02 a duré 3 jours, avec répétition de 8 stations dont 3 de production. Les valeurs intégrées journalières sont de 674, 309 et 309 mgC, et les 3 profils verticaux présentent d'importantes dissemblances (fig. 7). Le facteur lumière ne semble pas devoir être retenu, les taux comme les courbes d'irradiation journaliers, ainsi que les profils de pénétration lumineuse étant fort proches (BRICAUD, 1980). Par contre, l'évolution de la distribution du nitrate au cours de ces 3 jours trahit l'existence de mouvements pulsionnels de brève fréquence, la nitracline pouvant présenter des décalages d'une vingtaine de mètres en quelques heures (1 h 1/2 sépare les stations 36 et 48).

(1) Il faut toutefois tenir compte du fait que dans les systèmes d'upwellings la variabilité à court terme est plus importante que dans le système tropical typique, à amplitude de variation plus basse : l'échantillonnage risque ainsi de se trouver biaisé au niveau des eaux les plus productives, dont les « pics » peuvent passer inaperçus.



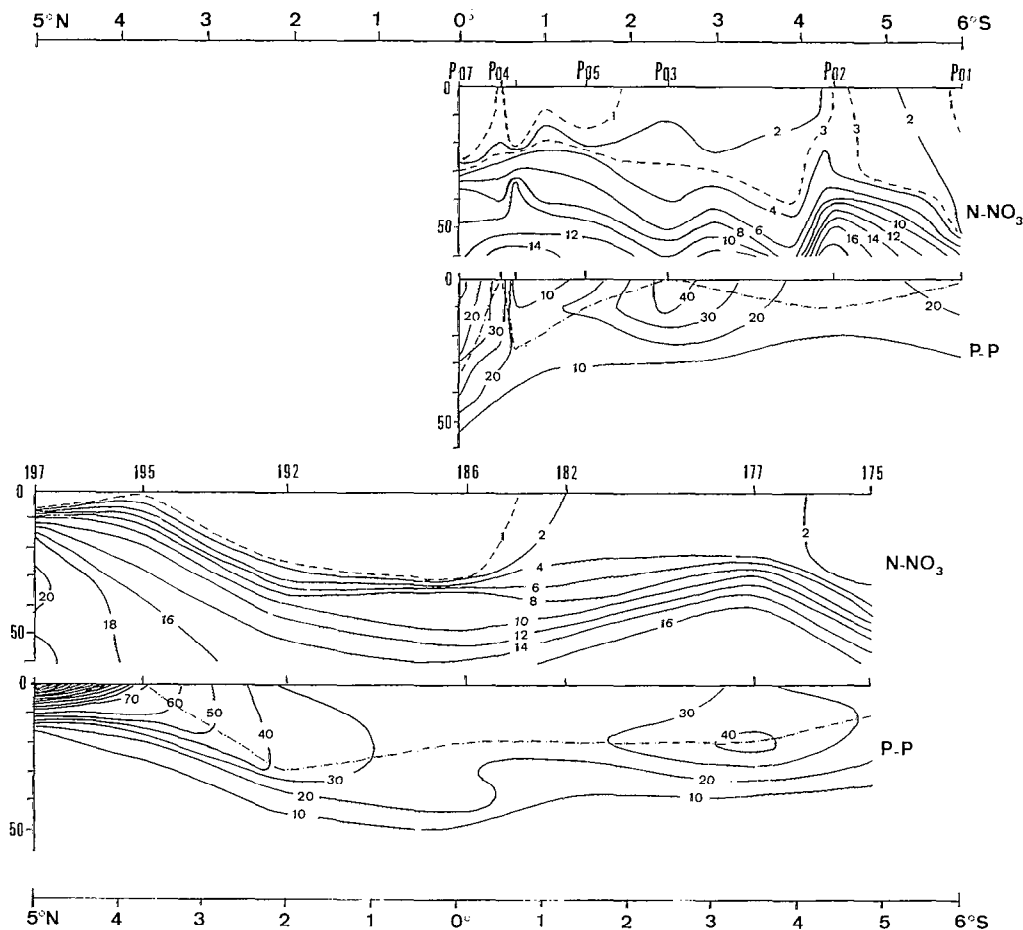


FIG. 6. — Distributions du nitrate ( $\mu\text{atg.l}^{-1}$ ) et de la production primaire ( $^{14}\text{C-mgC.m}^{-3}.\text{j}^{-1}$ ) lors de 2 sections de la radiale à  $4^{\circ}$  W : — en haut : section B de la figure 1 ; -- en bas : section D de la figure 1. En pointillé, profondeur de  $a_{\text{max}}$

Nitrate ( $\mu\text{atg.l}^{-1}$ ) and primary production ( $^{14}\text{C-mgC.m}^{-3}.\text{j}^{-1}$ ) distributions during 2 transects of the leg at  $4^{\circ}$  W: — top: transect B of figure 1; — bottom: transect D of figure 1. Dashed line:  $a_{\text{max}}$  depth

A ces mouvements pulsionnels verticaux s'ajoute — ou se substitue ? — ce que l'on peut appeler le « balancement » nord-sud de l'upwelling (qui, en effet, pourrait rendre compte également de ce qui précède, le navire restant en point fixe à travers des masses d'eau dérivant); au cours de la même radiale, 4 jours et  $0^{\circ}10'$  de latitude séparent la station 83 de la station P-04 (fig. 1 et fig. 6 a). La première présente les caractéristiques de la situation tropicale typique, mais le maximum profond de chlorophylle peu marqué, la faible épaisseur de la couche homogène suggèrent que la situation est récente et probablement transitoire; la valeur intégrée de

production,  $515 \text{ mgC.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$  est la plus basse rencontrée dans ce type de système; l'irradiation totale pour la journée n'ayant pas atteint  $1\,000 \text{ j.cm}^{-2}$  (l'irradiation moyenne journalière dans cette région équatoriale est de l'ordre de  $2\,000 \text{ j.cm}^{-2}$ ), on peut penser que l'éclairement a joué un rôle fortement limitant, le taux intégré de production dans ce type d'eaux étant généralement fonction de l'importance du maximum profond, lié lui-même en grande partie à la quantité de lumière disponible à ce niveau (1).

A la station P-04 (145, 147, 149), on se trouve par contre en situation intermédiaire, stationnaire durant les 3 jours, avec maintien et même léger

(1) Notons qu'on ne décèle pas cette influence de la quantité de lumière reçue dans le cas d'eaux appartenant au système d'upwelling — cas des stations 87, 92 et 114 (P-05) pour lesquelles, à des irradiances journalières de 800, 1700 et  $2000 \text{ j/cm}^2$ , correspondent des productions intégrées de 647, 608 et  $613 \text{ mgC}$ .

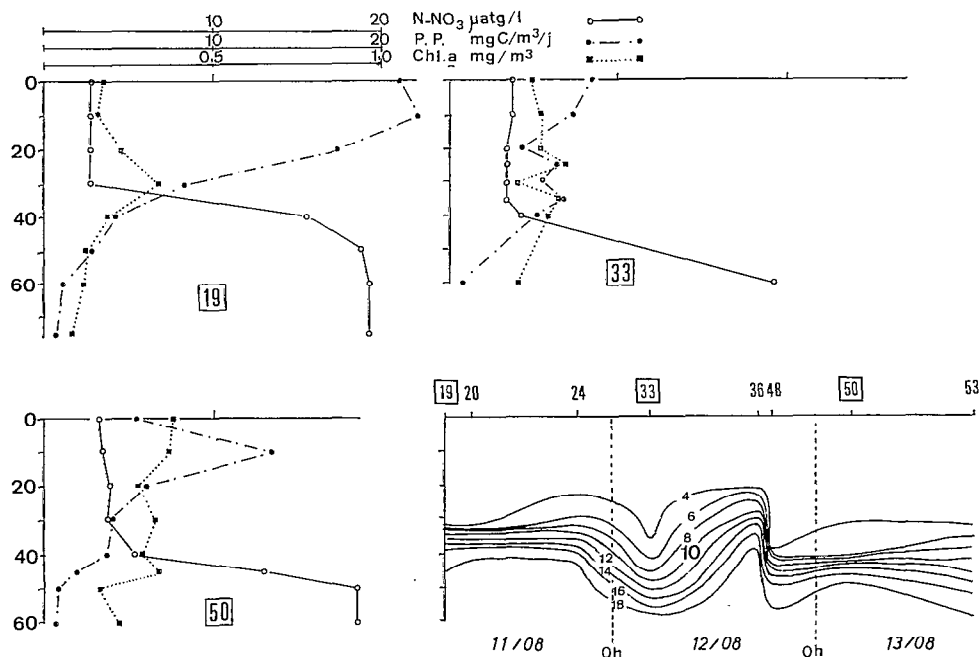


FIG. 7. — Profils verticaux de production primaire ( $^{14}\text{C}$ ), de chlorophylle  $a$  et de nitrate à la station longue durée P-02, occupée pendant 3 journées consécutives, avec une mesure de production chaque jour (stations 19, 33 et 50). Distribution du nitrate pendant ces 3 jours ( $\mu\text{atg.l}^{-1}$ )

Primary production ( $^{14}\text{C}$ ), chlorophyll  $a$  and nitrate vertical profiles at the 3-days station P-02, including daily production measurement (stations 19, 33 and 50). Nitrate ( $\mu\text{atg.l}^{-1}$ ) distribution during these 3 days

accroissement du stock superficiel de nitrate, de la chlorophylle  $a$ , et de la production le troisième jour (tabl. I).

HERBLAND et LE BOUTEILLER (1982) qui ont constaté et décrit ce « balancement » et son influence sur le type d'écosystème, l'attribuent à des méandres du courant de Lomonosov.

## CONCLUSIONS

La campagne CIPREA I, effectuée à l'époque de l'année où la divergence équatoriale de l'Atlantique-est présente une situation d'upwelling, permet de préciser le fonctionnement du système productif lié à ce mode d'enrichissement.

Le centre actif de l'upwelling a été rencontré à une latitude beaucoup plus méridionale que celle observée lors de précédentes campagnes, entre  $1^{\circ}30'$  et  $4^{\circ}30'$  S. Si l'on retrouve le schéma décrit, avec existence du front thermique au nord de l'Équateur et d'une zone de transport vers le sud, les isoplèthes de nitrate semblent indiquer qu'une zone de transport vers le nord prend place entre le centre de la remontée et la plongée sous le front thermique. La symétrie des structures hydrologiques par rapport

à la zone-source se retrouve dans les distributions des taux de production, avec une zonation depuis le cœur de l'upwelling semblable à celle observée dans les upwellings côtiers : la région centrale où les eaux de remontée récente, froides et riches en éléments nutritifs, sont peu productives et présentent de faibles biomasses phytoplanctoniques, est encadrée par des zones où production et biomasse croissent jusqu'à épuisement des éléments nutritifs. Le mouvement ascensionnel n'est pas constant et varie en intensité et en emplacement, présentant des séquences pulsionnelles qui viennent enrichir la couche homogène superficielle. C'est néanmoins dans le système à deux couches au nord du front thermique équatorial, que l'on trouve les eaux les plus productives et les concentrations en biomasse les plus importantes; on peut penser, comme l'ont suggéré VOITURIEZ et HERBLAND (1977) que ces eaux en plongée, enrichies en chlorophylle par l'upwelling, bénéficient en outre d'une stabilité élevée dans la thermocline, qui favorise le développement phytoplanctonique (HERBLAND et LE BOUTEILLER, 1982).

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

## BIBLIOGRAPHIE

- BRICAUD (A.), 1980. — Mesures optiques, pp. 185-220. In : Campagnes CIPREA. L'upwelling équatorial du Golfe de Guinée. Juin-septembre 1978. *Publ. CNEXO*, série : Résultats des Campagnes à la Mer, 19 : 249 pp.
- HERBLAND (A.) et LE BOUTELLER (A.), 1982. — The meanders of Equatorial currents in the Atlantic Ocean : influence on the biological processes. *Océanogr. trop.* 17 (1) : 15-25.
- HERBLAND (A.) et LE BOUTELLER (A.), 1982. — Dynamique du phytoplancton et matière organique particulaire dans la zone euphotique de l'Atlantique équatorial. *Mar. Biol.*, 72 : 265-278.
- HISARD (P.), 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 Gale Equatorial Experiment* (Miami, 28 Feb. to 10 March, 1977).
- SLAWYK (G.), 1980. — L'absorption de composés azotés par le phytoplancton marin : Rôle dans la production primaire. Relations avec la photosynthèse et les variables du milieu extra- et intracellulaire. Thèse Doct. ès sci., Univ. Aix-Marseille II : 213 pp.
- VOITURIEZ (B.), 1980. — Campagnes CIPREA. L'upwelling équatorial du Golfe de Guinée. Juin-septembre 1978. *Publ. CNEXO*, série : Résultats des Campagnes à la Mer, 19 : 249 pp.
- VOITURIEZ (B.) et HERBLAND (A.), 1977. — 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° 4 : 313-331.
- VOITURIEZ (B.) et HERBLAND (A.), 1978. — Comparison of the coastal and open ocean upwelling ecosystems of the tropical eastern Atlantic. *Symposium on the Canary Current, Upwelling and living Resources*, communication n° 43.
- VOITURIEZ (B.), HERBLAND (A.) et LE BORGNE (R.), 1982. — L'upwelling équatorial de l'Atlantique Est pendant l'Expérience Météorologique Mondiale (PEMG), *Oceanol. Acta*, 5 : 301-314.
- YANG (D. B.), 1980. — Contribution à l'étude des sels nutritifs dans la divergence équatoriale atlantique (Golfe de Guinée). Campagne CIPREA, été 1978. Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Univ. Aix-Marseille II : 73 pp.