
LES SELS NUTRITIFS AU LARGE DE LA CÔTE-D'IVOIRE

Alain HERBLAND et Pierre LE LœUFF

Introduction

Par définition, les sels nutritifs sont des constituants minéraux dissous dans l'eau de mer et impliqués dans le métabolisme des êtres vivants. Ils se situent donc à l'interface physique/biologie, ce qui rend leur étude doublement intéressante puisqu'ils peuvent être utilisés à la fois comme traceurs de masse d'eau (dans une optique physique) ou comme indicateurs de richesse potentielle (dans une optique biologique). Ce double intérêt présente malheureusement un revers : l'interprétation de leur distribution s'avère complexe, surtout dans les eaux superficielles où les phénomènes biologiques et physiques présentent des variations à court terme que, bien souvent, la maille insuffisante de la grille d'échantillonnage ne permet pas de discerner.

Par ailleurs, la définition « sels nutritifs » s'applique traditionnellement à plusieurs formes de composés minéraux qui sont, pour l'azote : les ions nitrate, nitrite, ammonium, pour le phosphore, l'ion orthophosphate et pour le silicium l'ion silicate.

Bien qu'ils aient des propriétés communes et des distributions comparables, chacun de ces sels possède une signification particulière et leur étude simultanée est nécessaire pour caractériser le type de production dont ils sont à l'origine : production nouvelle, production de régénération dans le cas de l'azote, abondance des diatomées et des silicoflagellés dans le cas de la silice, etc.

Par conséquent, une étude complète de la distribution et du rôle des sels nutritifs dans une région devrait aborder ces différents aspects : circulation, mélanges d'eau, phénomènes de production primaire et de régénération par les hétérotrophes. C'est ce qu'a tenté OUDOT (1983), dont l'article de synthèse, à l'échelle du golfe de Guinée, reste la référence pour les différents types de sels nutritifs dans cette région de l'Atlantique.

Compte tenu du nombre et de la qualité des données disponibles, il va de soi que l'étude présentée ici n'a pas la prétention de « faire le tour » de la question sur le plateau continental ivoirien. Il serait dangereux de demander à des données anciennes plus que ce qu'elles peuvent apporter. Depuis 1956, date des premières mesures de sels nutritifs devant Abidjan, les méthodes d'analyse ont changé, la sensibilité et la précision se sont améliorées ; il est possible d'ailleurs, de déceler cette amélioration entre 1956 et 1970 (voir *infra*).

Dans ces conditions, la présente étude n'a d'autre ambition que de tracer les grands traits du cycle de deux sels nutritifs (nitrate et phosphate) et de leurs principales variations saisonnières et interannuelles sur le plateau continental ivoirien.

On tentera quand même, à la lumière de ce qui est connu pour l'ensemble du golfe de Guinée, de dégager quelques hypothèses sur la nature des réseaux trophiques dans les eaux ivoiriennes.

Origine des données, méthodes et évolution de leur qualité

ORIGINE

Les données qui ont permis la réalisation de cette étude sur les sels nutritifs de Côte-d'Ivoire ont, pour l'essentiel, été extraites des fichiers du Bureau national des données océanographiques (centre IFREMER de Brest) ; elles ont pu être complétées par une série couvrant les années 1960, 1961, 1962 et appartenant aux archives du Centre de recherches océanographiques d'Abidjan.

Manifestement, les valeurs ont été saisies sans avoir été vérifiées ni surtout critiquées, car un important travail de correction, de contrôle, et de normalisation des unités (conversion de mg/m^3 en $\mu\text{mol}/\text{l}$ dans le cas des mesures réalisées avant 1962) a dû être mené à bien avant qu'une quelconque utilisation puisse être envisagée. Tous les chiffres douteux ont été écartés. Ainsi, dans un fichier qui intéresse les années 1956 à 1980, on est arrivé à ne conserver qu'un nombre limité de données qui peuvent être regroupées en quatre grandes séries portant sur :

a) *Le suivi d'une station à 24 milles au sud d'Abidjan* ($4^{\circ}51' \text{ N}$, $4^{\circ}02' \text{ W}$), aux accores (fonds de 1 500 m) du plateau continental, au cours des années 1956 à 1962, avec une reprise en 1965. On dispose de mesures de phosphates, certaines années de nitrites (1956, 1957, 1960), et, plus rarement, de nitrates (1957) et silicates (1960).

b) *L'étude d'une radiale au sud d'Abidjan*, à la même longitude ($4^{\circ}02' \text{ W}$), avec quatre stations à $5^{\circ}14' \text{ N}$ (fonds de 25 m), $5^{\circ}13' \text{ N}$ (fonds de 50 m), $5^{\circ}05' \text{ N}$ (fonds de 270 m), $4^{\circ}51' \text{ N}$ (fonds de 150 m), en 1960, 1962 et 1965. Seules les mesures de phosphates peuvent être considérées comme suffisamment fiables.

c) *L'étude d'une radiale au sud de Grand-Bassam* ($3^{\circ}49' \text{ W}$) comportant 7 stations : $5^{\circ}12' \text{ N}$ (fonds de 15 m), $5^{\circ}10' \text{ N}$ (fonds de 30 m), $5^{\circ}05' \text{ N}$ (fonds de 60 m), $5^{\circ}02' \text{ N}$ (fonds de 90 m), $5^{\circ}00' \text{ N}$ (fonds de 200 m), $4^{\circ}50' \text{ N}$ (fonds de 1500 m), $4^{\circ}40' \text{ N}$ (station du large). Les campagnes mensuelles ont eu lieu de janvier 1969 à mai 1970 sans interruption, soit au total 18 campagnes. Phosphates, nitrates et nitrites ont été mesurés.

d) *Les résultats d'une campagne cap des Palmes-Abidjan* : en juillet 1979, une douzaine de stations ont été exploitées à distance régulière d'environ 20 milles le long de l'isobathe 60 m sur toute la partie ouest de la Côte-d'Ivoire. Des relevés de teneurs en phosphates, nitrates, nitrites et silicates ont été obtenus.

Par le biais de l'utilisation de la relation température/ NO_3 , les *stations côtières* et les *campagnes PK* (29 campagnes sur le plateau continental ivoirien de juillet 1969 à juillet 1972) ont été également utilisées.

MÉTHODES D'ANALYSES

Dans les relevés les plus anciens (VARLET, 1954, 1958), les phosphates, nitrites et silicates ont été analysés selon la méthode de WATTENBERG (1937) et les nitrates selon la méthode de ROCHFORD (1947).

Les données les plus récentes relèvent des techniques préconisées par STRICKLAND et PARSONS (1968).

ÉVOLUTION DE LA QUALITÉ DES MESURES, CONSÉQUENCES POUR LEUR UTILISATION

Quand on utilise des données anciennes, recueillies avec des méthodes d'analyse qui ne sont plus celles d'aujourd'hui, il faut se montrer prudent et avoir à l'esprit que l'imprécision des mesures n'autorise pas des conclusions qui semblent évidentes aujourd'hui.

Cette évolution de la qualité des mesures apparaît clairement au travers de la série pluri-annuelle des relations entre la température et le phosphate. Entre 1956, date des premières analyses à la station de 24 milles et 1970, année de la fin de la série, la relation entre température et phosphate devient de plus en plus étroite (figure 1), comme le reflète aussi l'évolution des coefficients de corrélation pendant cette période (figure 2 et tableau I). Un phénomène équivalent, bien que moins démonstratif parce que reposant sur un plus petit nombre d'années, a aussi été mis en évidence dans le cas de la relation nitrate-phosphate.

Ces observations sur la qualité des données historiques de sels nutritifs amènent à considérer qu'il vaut mieux utiliser les relations qui lient les sels nutritifs à la température, dès lors qu'elles ont pu être établies sur la base de mesures récentes.

TABLEAU I

Évolution de la relation température-phosphate entre 1956 et 1970 ($y = \text{temp.}$, $x = \text{PO}_4$)
Pour le calcul de la régression, les valeurs de $\text{PO}_4 < 0,2 \mu\text{mol/l}$ n'ont pas été prises en compte

Année	Équation de la droite	r^2	n
1956	$y = - 3,712 x + 20,617$,194	41
1957	$y = - 2,284 x + 18,862$,146	57
1958	$y = - 5,017 x + 22,562$,581	266
1959	$y = - 6,376 x + 23,208$,513	163
1960	$y = - 6,100 x + 22,808$,663	243
1961	$y = - 6,708 x + 22,665$,724	196
1962	$y = - 4,867 x + 21,898$,517	97
1965	$y = - 7,027 x + 23,212$,794	10
1969	$y = - 6,990 x + 25,004$,910	79
1970	$y = - 5,858 x + 23,260$,982	25

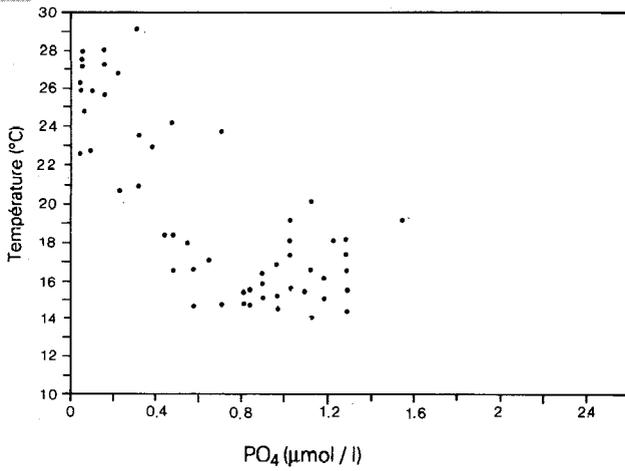
Cycle annuel des phosphates au sud d'Abidjan et de Grand-Bassam. L'année moyenne

Compte tenu du trop petit nombre de données de nitrates, on s'est intéressé au phosphate que l'on sait, aujourd'hui, bien corrélé au nitrate.

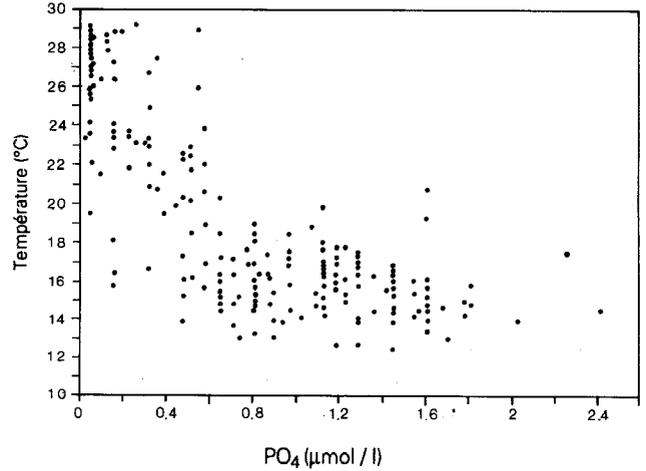
VALEURS MAXIMALES DE PO_4 AU COURS D'UN CYCLE ANNUEL DANS LA COUCHE SUPERFICIELLE (0-10 m)

La valeur maximale mesurée permet d'avoir une idée de l'*intensité maximale instantanée de l'enrichissement* des couches superficielles, chose que le calcul d'une valeur moyenne pourrait masquer. Or, on le sait aujourd'hui, le phytoplancton est capable d'exploiter des enrichissements éphémères, même de

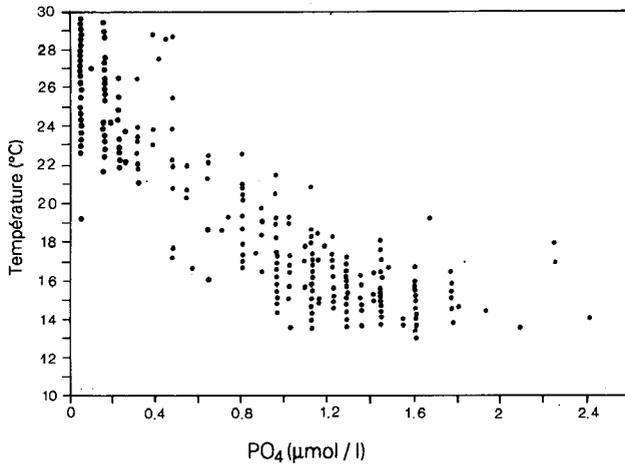
ANNÉE 1956



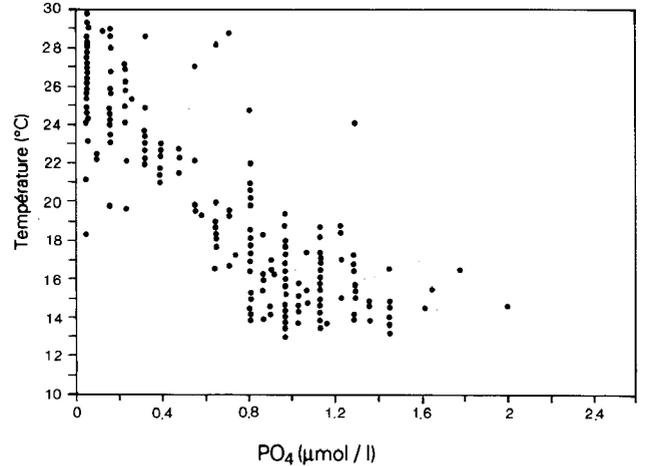
ANNÉE 1957



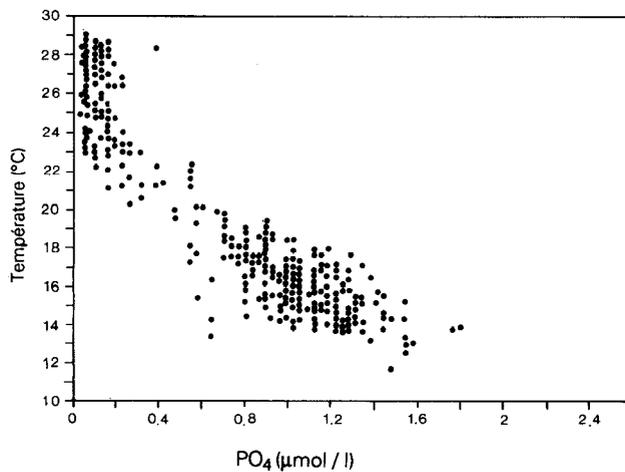
ANNÉE 1958



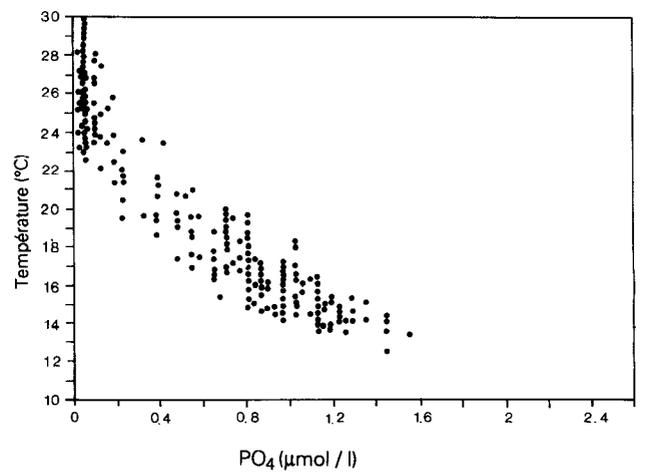
ANNÉE 1959



ANNÉE 1960



ANNÉE 1951



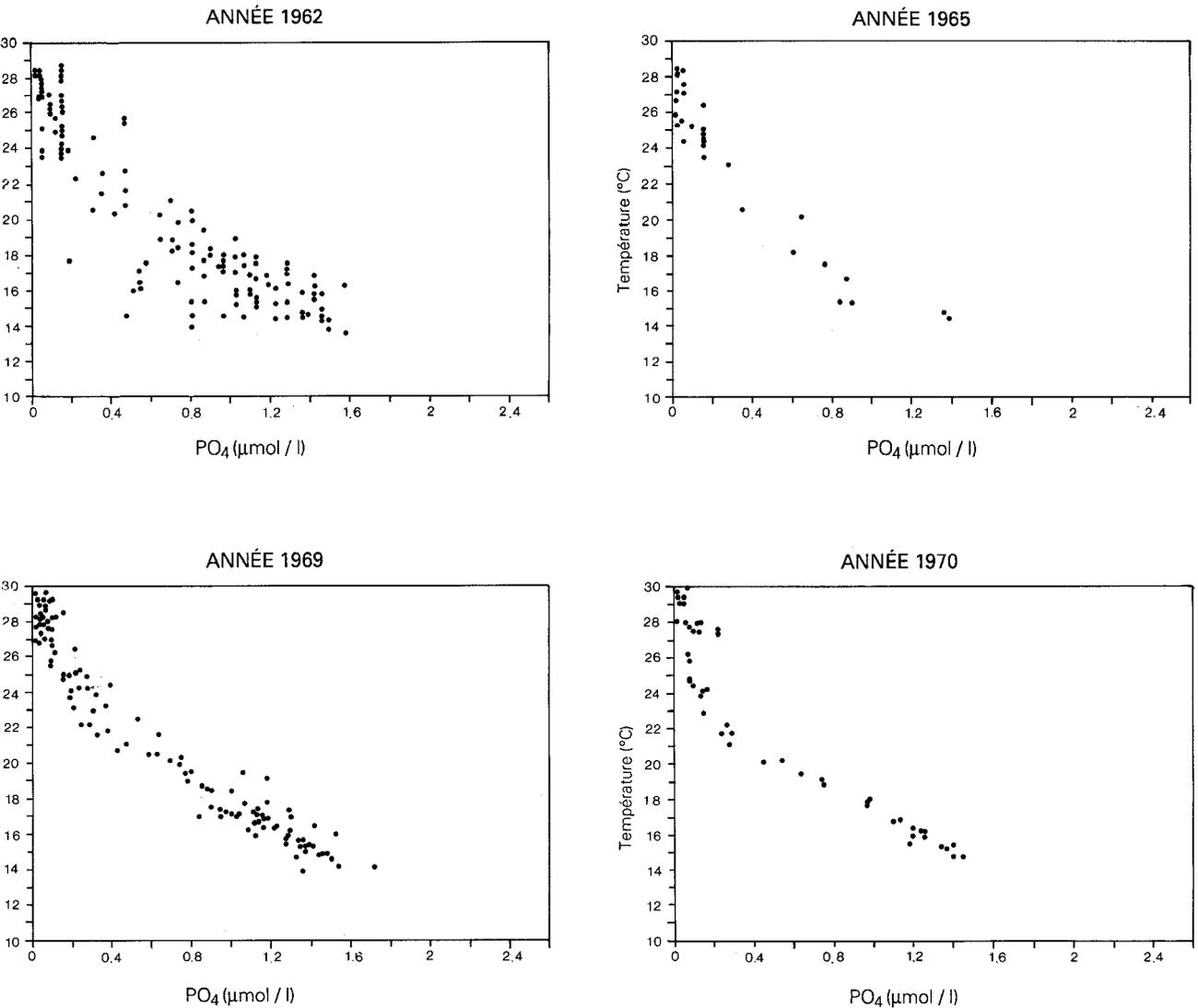


Figure 1

Évolution au cours des années de la relation température-phosphate à la station 24 milles au large d'Abidjan. La diminution de la dispersion apparaît clairement (PO_4 : $\mu\text{mol/l}$, T : $^{\circ}\text{C}$).

faible intensité. Au-delà du caractère anecdotique d'une valeur isolée, les valeurs maximales ont donc une signification écologique.

Pendant la saison froide et sur l'ensemble des années d'observation, les valeurs maximales sont de l'ordre de 0,9 à 1,2 $\mu\text{mol/l}$, avec en octobre (une fois) une valeur qui atteint 1,5 $\mu\text{mol/l}$. Ainsi, à la station située à 24 milles des côtes, la valeur maximale est typiquement de 1 à 1,2 $\mu\text{mol/l}$.

En comparant cette valeur à d'autres valeurs connues dans les grands upwellings côtiers et dans la divergence équatoriale (tableau II), on s'aperçoit que l'intensité maximale ponctuelle de l'upwelling ivoirien est du même ordre que celle de ces grands upwellings. Elle l'est d'autant plus que la station de référence est à 24 milles des côtes, et que la zone située au sud d'Abidjan n'est pas celle où l'intensité de l'upwelling est maximale (cf. figure 9 ; MORLIÈRE et REBERT, 1972).

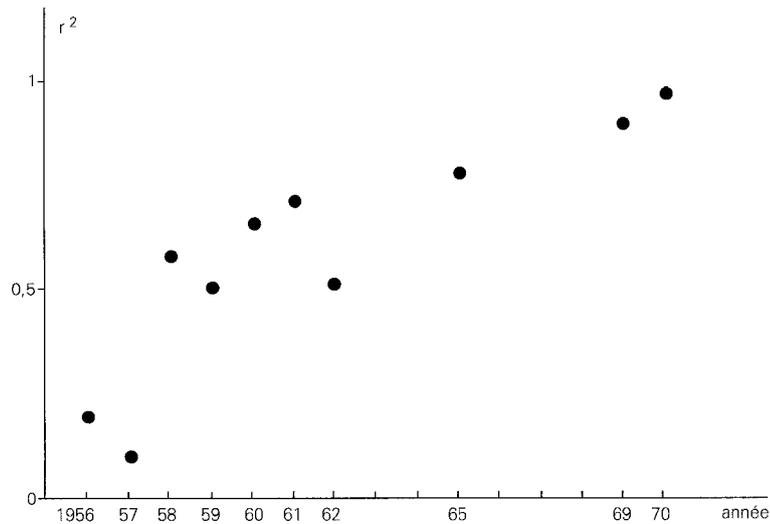


Figure 2

Évolution du carré du coefficient de corrélation entre la température et le phosphate au cours des années (mêmes données qu'à la figure 1, valeurs $\text{PO}_4 > 0.2 \mu\text{mol/l}$).

CYCLE ANNUEL DES VALEURS INTÉGRÉES DU PO_4 À DIFFÉRENTS NIVEAUX

Pour mieux caractériser le cycle annuel d'un sel nutritif, il est indispensable de s'intéresser à ce qui se passe sous la surface, d'autant plus que, dans les eaux tropicales, la présence d'une couche homogène, chaude et généralement épuisée (ou pauvre) en sels minéraux ne permet pas, à partir du seul examen des concentrations observées en surface, de déduire la richesse de la zone euphotique : une faible valeur de surface peut masquer une forte nutricline à 15 m ou faible à 50 m, ce qui, évidemment, est très différent en terme de production organique.

TABLEAU II

Valeurs maximales de PO_4 dans les eaux superficielles (0-10 m) de quelques upwellings

Région	Valeur ($\mu\text{mol/l}$)	Situation par rapport à la côte	Référence
Upwelling du Pérou	>2,5 1	à la côte à 20 milles	WALSH <i>et al.</i> , (1971)
Upwelling de Mauritanie	2	près de la côte (Cap Timiris)	HERBLAND <i>et al.</i> , (1973)
Upwelling du Sénégal	1,7 0,5	à la côte ou large	OUDOT (<i>comm. pers.</i>)
Divergence équatoriale	0,6	« au large »	OUDOT (1983)
Upwelling de Côte-d'Ivoire	0,9-1,2	24 milles	Présente étude

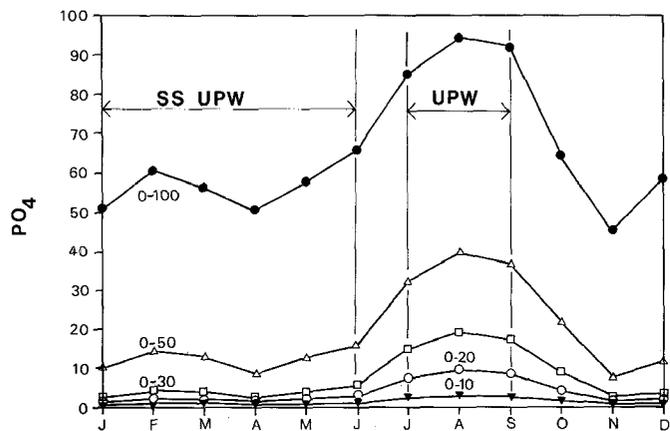


Figure 3
Moyennes mensuelles de phosphate (valeurs intégrées en mmol/m²) pour différentes épaisseurs de couche d'eau au cours de l'année (sud Abidjan et Grand-Bassam).

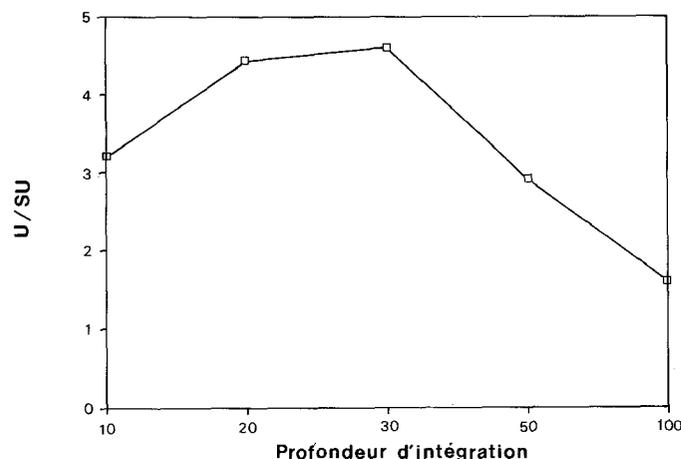


Figure 4
Évolution, en fonction de la profondeur d'intégration, du rapport valeur intégrée pendant l'upwelling/valeur intégrée sans l'upwelling (u/su) ; cette courbe montre que la couche la plus touchée par l'enrichissement saisonnier est celle située entre 0 et 30 m.

L'évolution des moyennes mensuelles, toutes années confondues (= année moyenne) des valeurs intégrées de phosphate dans plusieurs couches de la zone euphotique (10, 20, 30, 50, 100 m) est représentée sur la figure 3. Deux « saisons » apparaissent nettement : a) de novembre à mai, les concentrations de phosphate de la couche 0-30 m ne dépassent pas, en moyenne, 0,11 $\mu\text{mol/l}$ ($n = 125$ valeurs) et b) de juillet à septembre où cette valeur moyenne est de 0,56 $\mu\text{mol/l}$ ($n = 58$ valeurs).

L'étude attentive de ces courbes par niveau d'intégration met en évidence un phénomène intéressant : les couches 0-20 m et 0-30 m sont l'objet de l'enrichissement relatif le plus important, comme l'indique l'évolution du rapport « contenu en PO₄ pendant la saison froide/contenu en PO₄ pendant la saison chaude » en fonction de la profondeur d'intégration (figure 4). Ce résultat signifie simplement qu'une

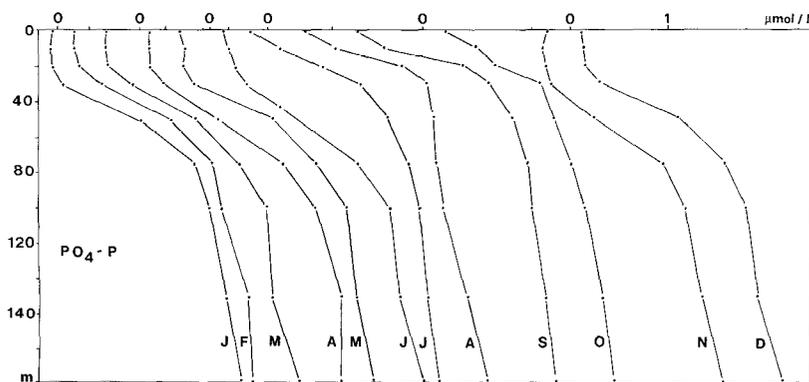


Figure 5
Évolution des profils moyens de phosphate à la station 24 milles.

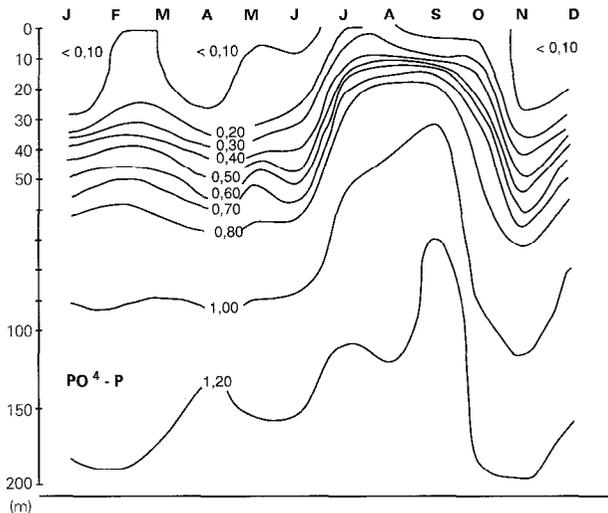


Figure 6

Autre façon de montrer les variations de la teneur en phosphate, l'évolution des isolignes : on distingue clairement la remontée et le resserrement en été, de juillet à septembre (PO_4 : $\mu\text{mol/l}$).

intégration sur une profondeur de 50 m prend en compte des valeurs qui sont élevées toute l'année, autrement dit, que le gradient de phosphate (la phosphatocline) se situe toute l'année à une profondeur inférieure à 50 m.

On retrouve ce résultat à l'examen des profils moyens mensuels (figure 5) : de novembre à mai, la couche homogène (ou pseudo-homogène) en phosphate ne dépasse pas 25-30 m de profondeur. Par ailleurs, il est remarquable que l'enrichissement de saison froide se caractérise par une remontée de la phosphatocline sans diminution de son gradient. Il apparaît même au contraire un resserrement des isolignes de juillet à octobre (figure 6).

Cela est en parfait accord avec les observations des physiciens (MORLIÈRE et REBERT, 1972) ; « This upwelling is directly linked to the displacement of the thermocline », souligne également PICAUT (1984). Cette propriété de l'enrichissement a des conséquences importantes sur la nature des réseaux trophiques (cf. Discussion. Conclusions).

Il faut noter que le maximum de remontée des couches profondes (isolignes 1,20 $\mu\text{mol/l}$) se situe en septembre, donc après le principal enrichissement, dans la couche superficielle (figure 6).

Relation nitrate-température : implications fondamentales et appliquées

L'étude de la relation nitrate-température présente un double intérêt :

a) Sur un plan fondamental, la conservation d'une relation entre la température et le nitrate est l'expression d'une unité de fonctionnement de l'écosystème pélagique : si, lorsqu'on passe d'une structure tropicale typique avec une nitracine à 50 m (pas de nitrate dans les 50 premiers mètres) à une situation d'upwelling où la nitracine « crève » la surface sans qu'il y ait modification significative de la relation nitrate-température, cela suppose qu'il n'y a pas eu accroissement de la consommation de nitrate au cours de la remontée et que l'équilibre entre les processus physiques et biologiques dont la relation nitrate-température est le signe n'est pas modifié ; autrement dit, le fonctionnement biologique des deux « systèmes » serait le même (VOITURIEZ et HERBLAND, 1984).

b) Sur un plan pratique, l'existence d'une relation étroite entre ces deux facteurs permet d'établir, à partir des données de température, beaucoup plus nombreuses et plus fiables que celles des nitrates, une cartographie de la profondeur du sommet de la nitracine qui, on le sait, reflète globalement l'intensité de la production primaire de la colonne d'eau (HERBLAND et VOITURIEZ, 1979).

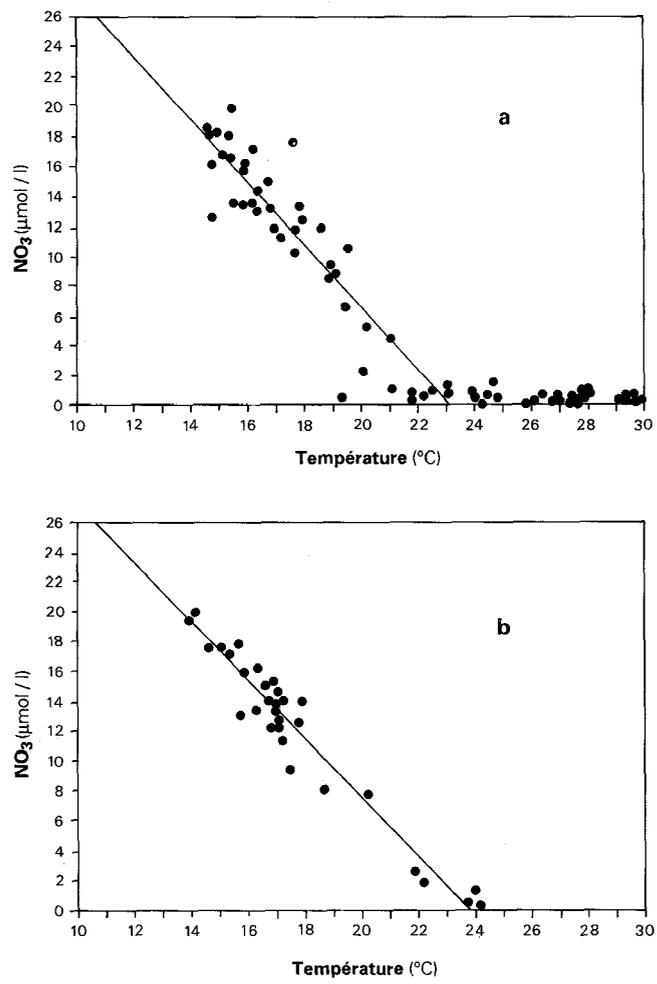


Figure 7
Relation nitrate-température sur la radiale de Grand-Bassam, années 1969 et 1970. a) novembre à mai ; b) juillet à septembre.

Il est donc doublement intéressant d'étudier la relation nitrate-température aux deux saisons caractéristiques définies plus haut (juillet à septembre et novembre à mai) afin de voir dans quelle mesure elle se modifie.

Les résultats acquis à la station 24 milles (figure 7 et tableau III) sont clairs : il n'existe pas, entre les deux saisons, de différences significatives à la fois de la pente et de la valeur de la température pour laquelle le nitrate devient égal à 1 μmol/l, valeur considérée comme indicative du sommet de la nitracline donc d'un enrichissement net. Il devient ainsi possible, à des fins pratiques, d'utiliser une seule relation globale :

$$NO_3 = - 2,06 T + 48,1$$

VOITURIEZ et HERBLAND (1984) ont étudié la relation nitrate-température dans le golfe de Guinée et plus spécialement sur la « radiale 4° W » entre 0 et 5° S, lors des cinq campagnes CIPREA, en présence et en l'absence de l'upwelling équatorial. Ici également, les différentes relations NO₃-température obtenues lors des différentes campagnes océanographiques n'ont pas fait apparaître de variations significatives d'une saison à l'autre et, résultat important, la relation générale, tous points confondus (n = 540, r = - 0,95) a pour expression :

$$NO_3 = - 1,88 T + 45,5$$

De même, OUDOT et MORIN, (1987) ont étudié cette relation à 4° W entre 5° N et 5° S lors des 7 campagnes FOCAL (741 couples de points). La relation moyenne est la suivante :

$$NO_3 = - 2,07 T + 48,8$$

TABLEAU III
Relations NO_3 -température. Station 24 milles (NO_3 : $\mu\text{mol/l}$)

Saison froide juillet à septembre (1969 + 1970)	$\text{NO}_3 = -1,97 T + 46,9$	$n = 31$	$r = -0,96$
Saison chaude novembre à mai (1969 + 1970)	$\text{NO}_3 = -2,12 T + 48,8$	$n = 45$	$r = -0,93$
Les deux saisons confondues (1969 + 1970)	$\text{NO}_3 = -2,06 T + 48,1$	$n = 76$	$r = -0,93$
	(quand $T = 23^\circ\text{C}$, $\text{NO}_3 = 0,72$)		
Moyenne à CIPREA	$\text{NO}_3 = -1,88 T + 45,5$	$n = 540$	$r = -0,95$
Moyenne à FOCAL	$\text{NO}_3 = -2,07 T + 48,8$	$n = 741$	$r = -0,96$

Ces deux équations ne sont pas significativement différentes de la relation obtenue à la station 24 milles devant la Côte-d'Ivoire.

Sur un plan fondamental, la similitude des relations NO_3 -température en saison chaude et en saison d'upwelling signifie que l'on peut appliquer à l'upwelling ivoirien, tout au moins dans la zone du large, les mêmes conclusions que celles auxquelles sont parvenus VOITURIEZ et HERBLAND (1984) dans leur étude sur la divergence équatoriale, à savoir que la structure et le fonctionnement du réseau trophique ne semblent pas fondamentalement modifiés pendant la période d'upwelling (cf. Discussion. Conclusion).

Variations spatiales

GRADIENT CÔTE-LARGE

Il est intéressant de connaître l'étendue vers le large de l'enrichissement et l'évolution de son intensité avec l'éloignement du rivage et du plateau continental. En d'autres termes, le plateau continental joue-t-il un rôle d'amplificateur de l'enrichissement ? Y-a-t-il remontée des isolignes à l'approche du plateau continental ?

On dispose des données recueillies sur la « radiale Bassam » en 1969-1970. Seule la série des mesures de phosphate de l'année 1969 est complète ; c'est donc ce sel nutritif qui a retenu l'attention, mais, répétons-le, sa corrélation avec le NO_3 , surtout au large, est excellente (figures 17 à 19).

On a tenté de synthétiser l'essentiel de l'information en un schéma qui ne retiendra qu'un seul critère. Le point clé dans la distribution du phosphate (ou du nitrate) est le sommet de la nutricline dont la profondeur reflète la richesse potentielle de la colonne d'eau. Le phénomène a été démontré dans le cas des nitrates (généralement le sel nutritif limitant en zone tropicale), puisque la profondeur du sommet de la nitracline est corrélée positivement à la production primaire intégrée de la colonne d'eau (HERBLAND et VOITURIEZ, 1979). C'est donc ce critère, matérialisé par la profondeur de l'isoplèthe $0,30 \mu\text{mol/l}$ de PO_4 , qui est présenté sous forme d'un diagramme spatio-temporel. Il apparaît clairement (figure 8) :

— que si l'enrichissement n'est pas limité au plateau continental (à 32 milles de la côte le sommet de la phosphatocline remonte à 10 m entre la mi-juillet et la mi-septembre) il est nettement plus important sur les petits fonds : de fin juin à fin octobre l'isoplèthe $0,30 \mu\text{mol/l}$ crève la surface sur les fonds de 30-40 m ;

- qu'en période chaude, c'est encore sur le plateau continental que les profondeurs de l'isoplèthe sont les plus faibles. Il y a très nettement un creux de la mi-avril au début juin et en novembre à partir des fonds de 200 m jusqu'à la limite sud de la radiale (4° 40' N) ;
- qu'une petite saison d'enrichissement, limitée au plateau continental est détectable en janvier-février, ce qui est conforme aux observations de MORLIÈRE (1970) et MORLIÈRE et REBERT (1972).

On retrouve là un résultat déjà décrit par INGHAM (1970) qui attribue cette différence d'élévation de la thermocline entre la côte et le large à un ajustement géostrophique. Il faut toutefois se souvenir que 1969 apparaît — au moins d'après les températures relevées à la station côtière — comme une « année froide ». Par conséquent, s'il est raisonnable de conserver le principe d'une remontée des isolignes à l'approche de la côte, le schéma présenté figure 8 n'est pas une représentation moyenne. Les années 1963, 1968 ou 1979 auraient montré une bien plus faible amplitude de l'enrichissement.

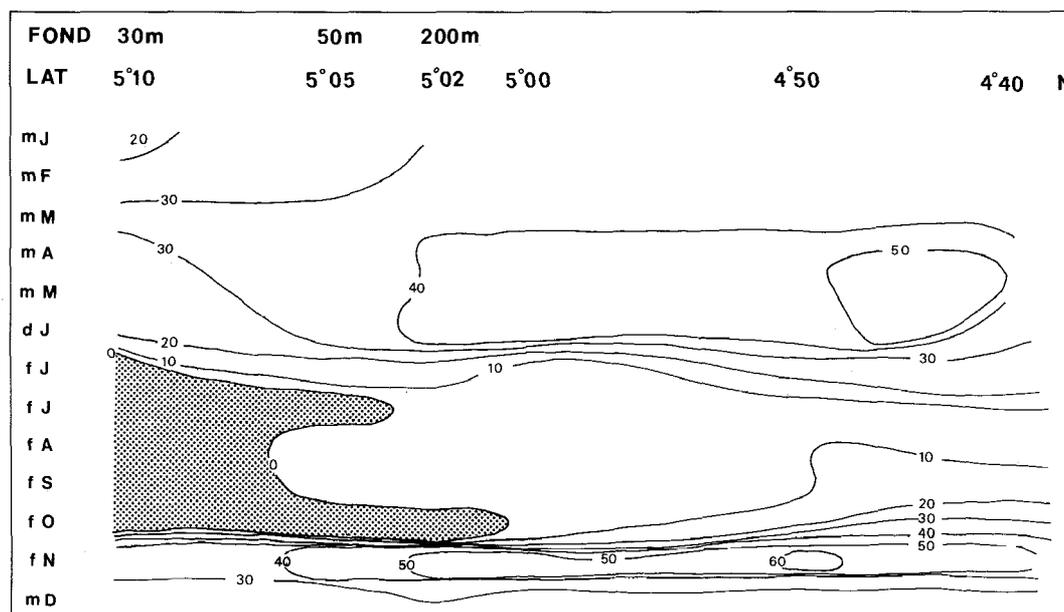


Figure 8

Évolution géographico-saisonnière de la profondeur de l'isoligne 0,3 $\mu\text{mol/l}$ de PO_4 représentant le sommet de la phosphatocline et donc la profondeur de l'enrichissement.

mj : mi-janvier, mf : mi-février, etc..., dj : début juin, fA : fin août, etc.

INTENSITÉ DE L'ENRICHISSEMENT LE LONG DU LITTORAL IVOIRIEN ENTRE 1979 ET 1985 ; HYPOTHÈSE DU DÉPLACEMENT DU « CŒUR » DE L'UPWELLING

Il est généralement admis que la zone la plus froide (donc la plus riche) se situe à l'ouest entre Tabou etassandra, comme l'ont montré MORLIÈRE et REBERT, 1972 (figures 9 et 10). L'application de la relation $T\text{-NO}_3$ à cette figure montre que le NO_3 est présent en surface entre Tabou et Port-Bouët, avec une extension vers le large plus importante à l'ouest qu'à l'est (température inférieure à 23 °C). Avant d'appliquer cette relation aux données des stations côtières, il est donc nécessaire de contrôler sa validité car les perturbations provoquées par le contact avec les fleuves, les lagunes et le fond compliquent les phénomènes et risquent de l'invalider.

On a ainsi sélectionné, sur les radiales Bassam (1969 et 1970), les 3 stations les plus côtières (fonds de 15, 30 et 50 m). Les résultats exprimés figure 11 montrent à l'évidence que la relation est moins

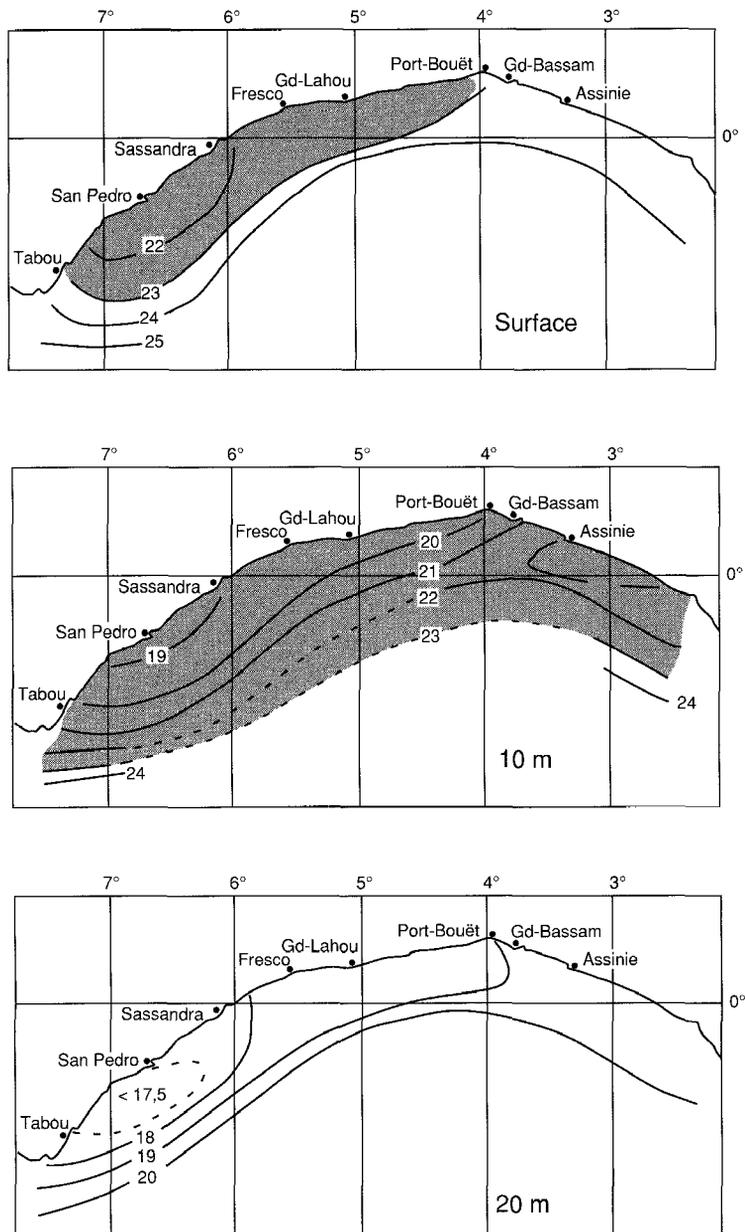


Figure 9

Carte des températures moyennes de saison froide à 0, 10 et 20 m (emprunté à MORU133RE et REBERT, 1972).

bonne : les points dont la teneur est très élevée en NO_3 pour une température donnée (groupe I) ont fait l'objet de relevés en juin-juillet, sur les petits fonds (15 et 30 m), au moment de la saison des pluies (crues des fleuves côtiers). On observe aussi quelques valeurs anormalement faibles (groupe II) qu'il semble difficile d'interpréter autrement qu'en les considérant comme des erreurs d'analyse (d'où peut provenir de l'eau à 19-20 °C avec des teneurs en nitrate inférieures à 5 $\mu\text{mol/l}$?). La relation n'a donc plus le caractère prédictif de celle du large. Cependant, il demeure vrai que l'eau dont la température est inférieure à 23 °C est toujours riche en nitrate (et en phosphate).

Par conséquent, lorsque l'isotherme 23 °C se maintient dans la zone euphotique, elle sera fertilisée. Il est donc tentant d'utiliser les données de température recueillies depuis 1979 sur l'ensemble des stations

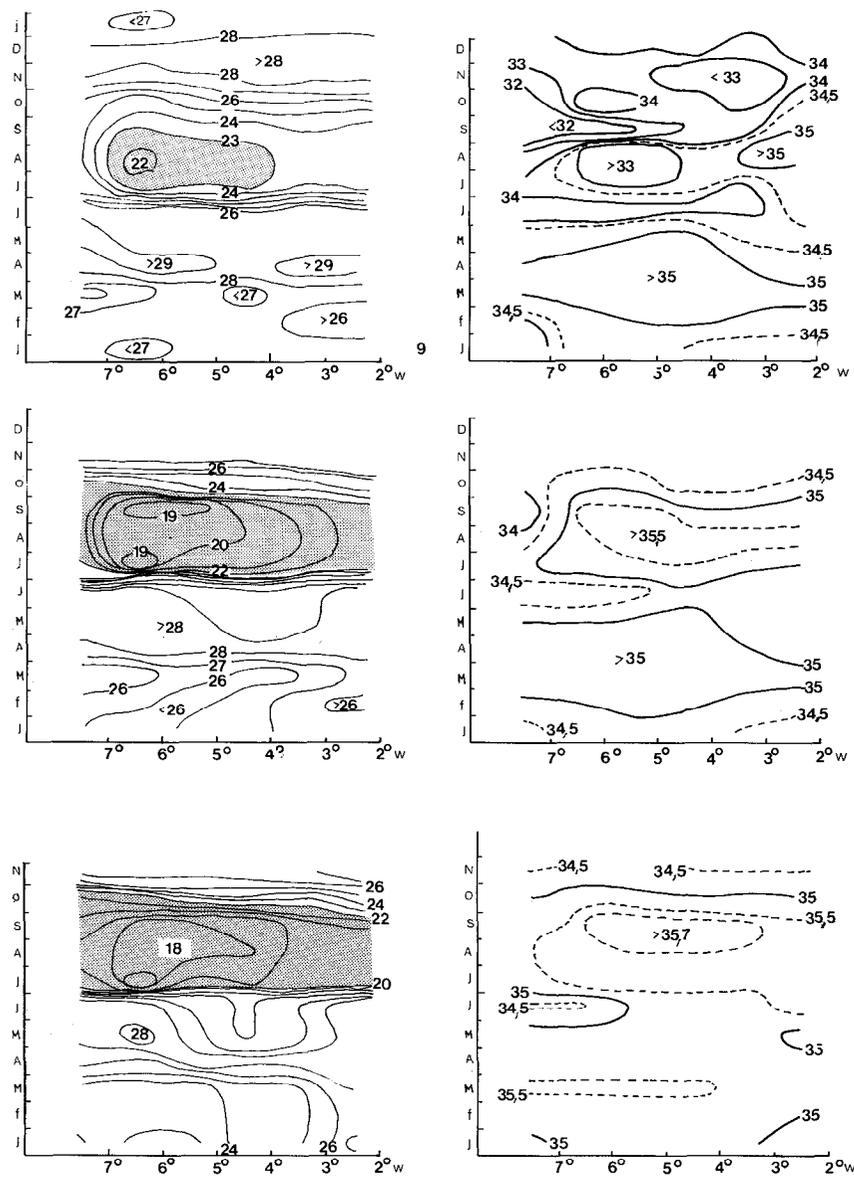


Figure 10

Diagrammes spatio-temporels : température et salinité à 0, 10 et 20 m (emprunté à MORLIÈRE et RÉBERT, 1972).

côtières pour estimer l'intensité de l'enrichissement dans le sens est-ouest (figure 12). Il s'agit de données de surface, de températures relevées depuis le rivage, (PRIVÉ et CORRE, 1979 et données communiquées par CHUCHIA). L'examen des résultats fait apparaître un curieux phénomène (figure 13).

De 1979 à 1981, le schéma est conforme à ce que l'on sait, c'est-à-dire que l'intensité de l'upwelling est maximale dans l'ouest (Tabou - Grand-Drewin) et minimale dans l'est (Assinie). 1982 apparaît comme une année intermédiaire ; le gradient est-ouest n'est plus aussi net : par exemple à Fresco, la saison de l'enrichissement-refroidissement a été de plus courte durée qu'à Assinie. De 1983 à 1985, on est presque tenté d'écrire que la tendance s'inverse : l'upwelling à Tabou est nettement moins important (en 1983 et 1984, pas de données en 1985) qu'à Port-Bouët ou Assinie.

S'il ne s'agit pas d'un biais dans les mesures et si l'observation est confirmée, elle aboutit à deux remarques :

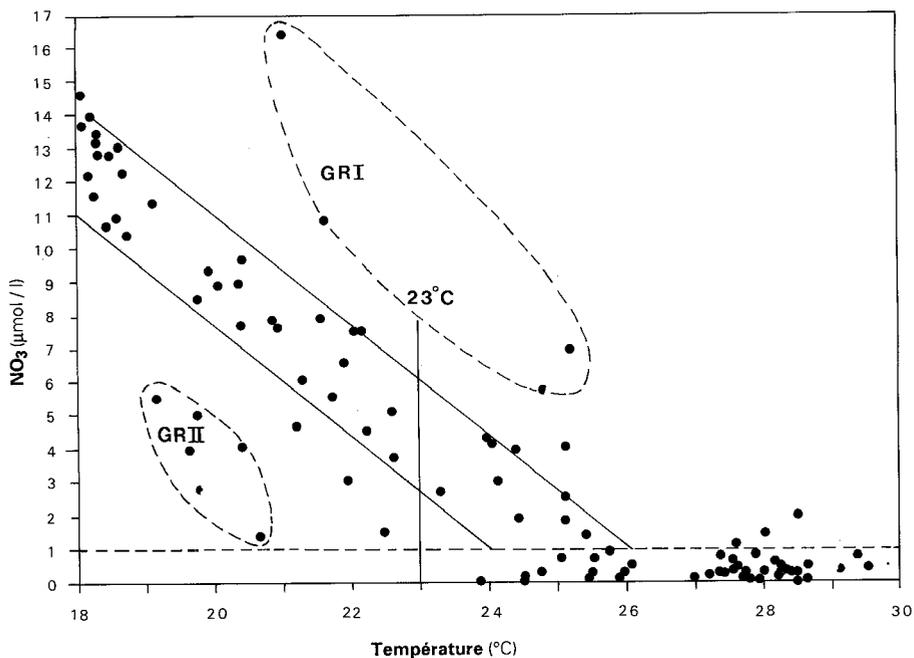


Figure 11

Relation température - nitrate sur les petits fonds (15, 30 et 50 m), de la radiale de Grand-Bassam (années 1969-1970).

- la première est qu'il faut être prudent quand on parle de l'intensité de l'upwelling ivoirien : un observateur placé à Assinie aura tendance à conclure que, de 1979 à 1985, la vigueur de l'enrichissement augmente (l'intégrale des courbes, reflet de l'intensité de l'upwelling, le montre clairement), tandis qu'un autre observateur, placé à Tabou, aurait tendance à conclure l'inverse ;
- la seconde concerne les conséquences biologiques et plus particulièrement la localisation des zones riches en phytoplancton et donc probablement de la ressource : il ne serait pas étonnant qu'il y ait eu entre 1979 et 1985 d'importants déplacements d'organismes herbivores (copépodes et poissons). Le développement spectaculaire des captures de *Sardinella aurita* en Côte-d'Ivoire depuis 1980-1981 n'est peut-être pas étranger à ces modifications (HERBLAND et MARCHAL, 1988).

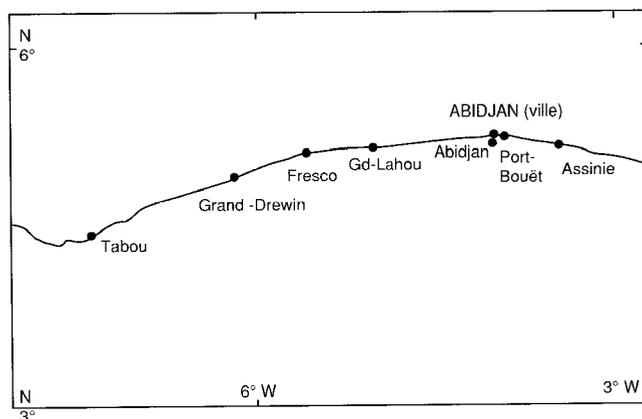


Figure 12

Localisation des différentes stations côtières de Côte-d'Ivoire dont les données sont utilisées pour construire la figure 13.

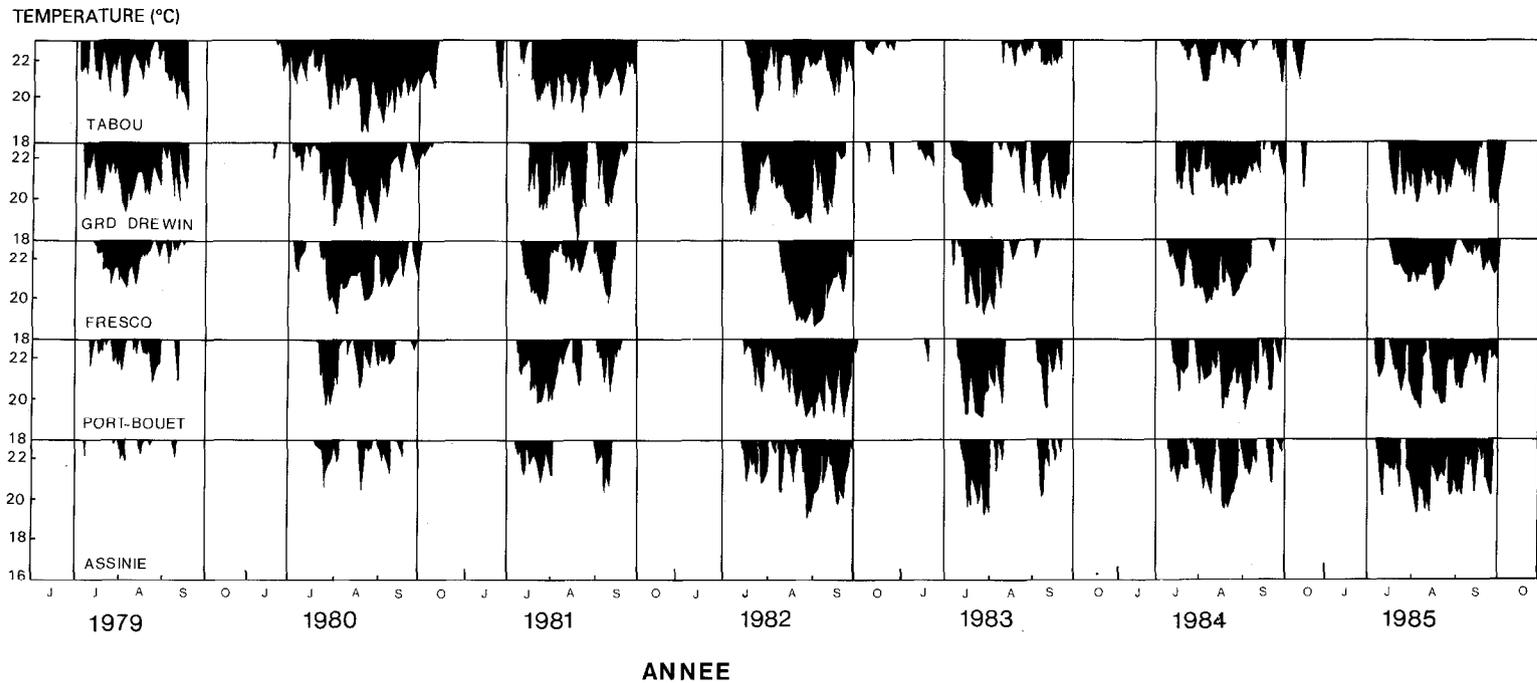


Figure 13

Évolution spatio-temporelle de l'intensité de l'upwelling, chaque « ligne » représente une station, chaque « colonne » une année (de juin à octobre).

Les courbes représentent la valeur de la température inférieure à 23 °C

(température considérée comme équivalente à la présence de nitrate dans l'eau. Voir texte.)

Variations interannuelles de l'upwelling entre 1956 et 1981

Pour étudier les variations de l'intensité de l'enrichissement saisonnier dû à l'upwelling au cours de ces 25 années, on dispose de 2 types de données :

- les valeurs de phosphate effectivement mesurées à la station « 24 milles » pendant les mois de juin-juillet-août entre 1956 et 1962, puis en 1965 et 1969 ;
- les valeurs de température à la côtière qui peuvent être exploitées par le biais de la relation T-NO₃ mise en évidence plus haut.

VALEURS DE PHOSPHATE À LA STATION 24 MILLES

Plutôt que de considérer uniquement les valeurs de surface qui peuvent masquer un fort enrichissement quelques mètres au-dessous, on a choisi 2 couches d'intégration : 0-10 m et 0-50 m. Cette dernière représente largement l'épaisseur de la couche euphotique.

Bien que le nombre d'observations soit faible et que les trois mois de la grande saison froide ne soient pas toujours tous échantillonnés, il est possible d'observer une certaine tendance, la même pour les deux couches (figure 14) : décroissance de l'intensité de l'upwelling pendant les années 1959-1965, avec, si on peut faire confiance aux mesures, un minimum marqué en 1965, puis retour aux valeurs « initiales » de 1957-1958 en 1969. Il n'y a malheureusement pas de données disponibles en 1963, 1964 et 1966, 1967, 1968. On sait cependant que l'année 1963, dans le golfe de Guinée fut une « année chaude » avec un upwelling équatorial très peu marqué (c'était l'année d'EQUALANT II, KOLESNIKOV, 1976 ; HISARD, 1980,). On peut donc logiquement penser que le point de l'année 1963 est aussi un « point bas » de la figure 14.

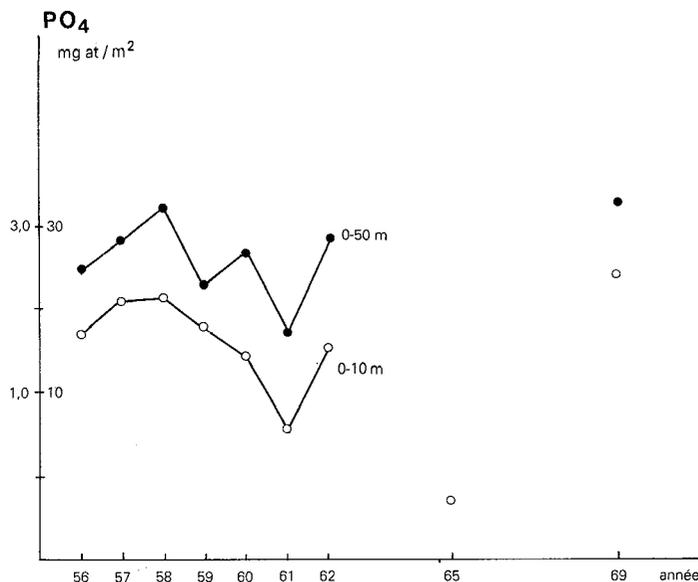


Figure 14
Évolution pluriannuelle des valeurs intégrées de PO₄ à la « station 24 milles » (au large d'Abidjan).

ENRICHISSEMENT À LA STATION CÔTIÈRE D'ABIDJAN

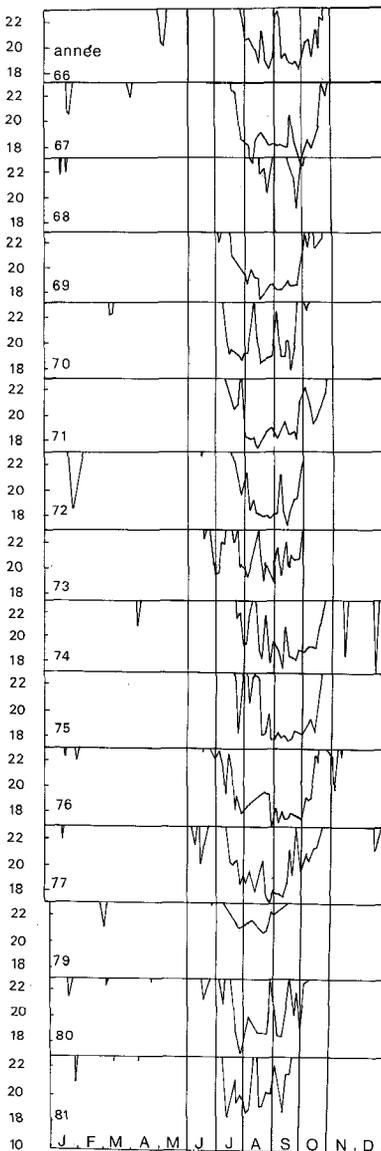
Il a paru intéressant, au travers de la longue série des données de température à la station côtière d'Abidjan, de repérer les périodes où l'isotherme 23 °C a atteint la profondeur de 10 m (encore une fois, 10 m paraît préférable à 0 m parce qu'un enrichissement en sels nutritifs ne doit pas nécessairement atteindre la surface pour provoquer un bloom phytoplanktonique). Les résultats sont exprimés sur la figure 15. Il est impossible de dégager une tendance, mais on peut remarquer :

- *des années à enrichissement très faible* : 1968 et 1979 se détachent nettement par un enrichissement faible et de courte durée de même que, dans une moindre mesure, 1981 ;
- *des années à très fort enrichissement* : 1967, 1969, 1976 et 1977.

Il faut noter, indépendamment de l'amplitude de l'enrichissement, de forts décalages dans le temps : par exemple en 1966, 1970 et 1974, l'upwelling n'est pas négligeable mais il est peu perceptible avant le début du mois d'août et il se prolonge au-delà de la mi-octobre. Au contraire, en 1973, il commence tôt (fin juin) et se termine également tôt : fin septembre.

La « petite saison froide » est très fluctuante, et, avec ce critère de sélection, n'est pas perceptible tous les ans : 1972 se détache nettement et semble avoir laissé des traces sur le développement du phytoplancton (DANDONNEAU, 1972). Pour les autres années, le manque de données sur le phytoplancton ne permet pas d'établir une relation entre l'intensité et la durée de l'enrichissement et le développement du phytoplancton.

Apports terrigènes



BINET (1983) a montré que « les fleuves et lagunes ivoiriens jouent incontestablement un rôle enrichissant sur la production primaire des eaux côtières » et comme rien de fondamentalement nouveau ou différent n'est apparu depuis, on se contentera de citer les passages les plus pertinents et informatifs de l'article :

« Les eaux de ruissellement vont se charger en éléments solides ou dissous, organiques ou minéraux et les transporter jusqu'à la mer. L'érosion dépend de la couverture végétale du sol, elle est de 10 à 15 fois plus importante en savane qu'en forêt (MONNET, 1971). Les savanes périodiquement brûlées, ou soumises à des cultures sarclées, sont beaucoup plus sensibles à l'érosion que celles couvertes de leur végétation naturelle (ROOSE, 1981). Néanmoins, les charges solides du Bandama (en g/m^3) sont assez constantes à Tiassalé, à 100 km de l'embouchure. Les exportations solides sont proportionnelles au débit qui varie, en moyenne, de $50 m^3/s$ en mars, à $1200 m^3/s$ en septembre. Elles présentent donc un aspect saisonnier très net (MONNET, 1971).

« Les transports en suspension sont importants, car la turbidité peut inhiber la photosynthèse dans le panache du fleuve. Par contre, un certain nombre de substances adsorbées sur les particules peuvent passer en solution lorsque les eaux fluviales se mélangent à l'eau de mer, et donc enrichir celle-ci. Enfin, il est possible que les particules organiques soient directement consommées par des animaux marins.

« Les éléments minéraux solubles sont, globalement, évidemment moins abondants dans les eaux de rivière qu'en mer. À Tiassalé, ils atteignent une valeur moyenne très modérée de $39 g m^{-3}$, et ne subissent que peu de variations saisonnières. La

Figure 15

Même principe que la figure 13, mais sur toute l'année, à la station côtière d'Abidjan. Seules les températures inférieures à $23^\circ C$ sont prises en compte.

silice forme la moitié de la charge de juillet à décembre et un tiers de celle-ci à l'étiage (MANGIN *et al.*, 1966). La charge soluble totale est, elle aussi, sensiblement fonction du débit liquide.

« En réalité, des expérimentations détaillées montrent (ROOSE, 1981) que les teneurs diminuent lorsque le volume écoulé augmente, pour presque tous les éléments sauf l'alumine et la silice. Les éléments les plus sensibles à cet effet de dilution sont, notamment, les nitrates et les matières organiques. Les premiers écoulements de l'année peuvent avoir des teneurs de 10 à 50 fois plus élevées qu'en fin de saison des pluies.

« D'autre part, le taux de matière organique des sols forestiers est beaucoup plus élevé que celui des sols de savane (ROOSE, 1981). Les premières pluies qui tombent sur la forêt se chargent en matière azotée. L'azote et les nitrates sont très mobiles en milieu tropical, tandis que le phosphore migre peu car il est rapidement insolubilisé au contact du fer et de l'alumine des sols. Le ruissellement qui a lieu plus tard, en savane, entraîne peu de matière organique (les sols de savane en sont pauvres), mais vraisemblablement des composés phosphorés, sous forme de particules, qui peuvent éventuellement passer en solution ultérieurement.

« Le long du littoral ivoirien, les eaux fluviales transitent plus ou moins longuement par un réseau de lagunes avant d'atteindre la mer. Selon DUFOUR *et al.* (1981), les eaux qui arrivent en lagune Ébrié, après avoir ruisselé dans la zone forestière (première saison des pluies) sont plus limitées par le phosphore que par l'azote, tandis que les eaux qui ont ruisselé dans les zones de savane (saison des crues) sont limitées par l'azote, mais moins intensément que les eaux de mer. Or, dans les eaux côtières, il n'y aurait pratiquement pas de limitation par le phosphore (RYTHER *et* DUNSTAN 1971). Donc les eaux de ruissellement sont enrichissantes en azote, plus particulièrement celles qui ont ruisselé en forêt.

« Finalement, il semble que les apports terrigènes au golfe ivoirien soient qualitativement très enrichissants (teneurs élevées, non limitées en azote) lors de la petite crue (juin - mi-juillet), mais, du fait de l'importance des débits, c'est probablement en grande crue qu'ils sont prépondérants (septembre, octobre, novembre), à cause des quantités de silice rejetées.

« Les mesures de silice de VARLET (1958, *in* REYSSAC 1970) sur une plage devant Abidjan (figure 16), montrent un minimum en avril, un petit maximum en juin-juillet et le maximum principal en octobre. Le mois d'août (petite saison sèche) est remarquable par sa pauvreté en silice. Autrement dit, la teneur en silice de l'eau néritique superficielle est indépendante de l'upwelling et varie comme les débits fluviaux.

« Or, selon diverses observations, la silice serait épuisée dans la zone euphotique avant l'azote et le phosphore, notamment dans les zones d'upwelling à cause de la consommation lors du bloom de diatomées (PAASCHE, 1980). DUGDALE (1972), HERBLAND *et* VOITURIEZ (1974) ont également signalé que la silice pouvait devenir le premier sel nutritif limitant après un bloom de diatomées. Par ailleurs, la flottabilité des diatomées dépendrait davantage de la disponibilité des silicates que de celle des nitrates et des phosphates (BIENFANG *et al.*, 1982).

« En conclusion, la forte crue qui succède à l'upwelling du mois d'août pourrait lever une éventuelle limitation en silice et permettre un fort développement de diatomées. Cela expliquerait indirectement pourquoi la biomasse zooplanctonique des mois à fort upwelling n'est pas liée à l'intensité des refroidissements, mais au volume des crues (BINET, 1976). »

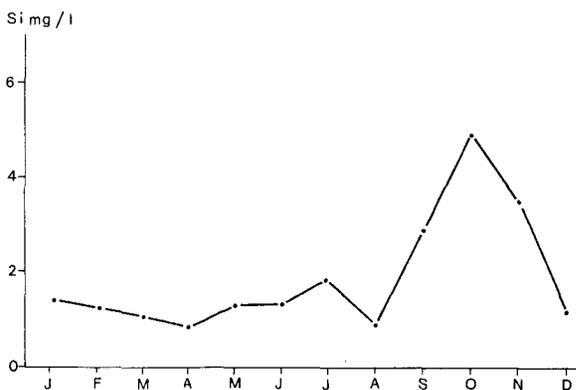


Figure 16
Silice en surface à Port-Bouët
d'après VARLET, *in* REYSSAC, 1970.

Relation nitrate-phosphate, identification du sel nutritif limitant

Il est bien connu que les distributions verticales de phosphate et de nitrate dans l'océan ont des points communs. L'Atlantique tropical oriental n'échappe pas à la règle : une corrélation étroite existe entre les concentrations de NO_3 et de PO_4 sur la verticale (OUDOT, 1983).

Cependant, on observe plusieurs différences :

- alors que le nitrate est le plus souvent indétectable ou à la limite de détection dans la couche homogène, il reste toujours quelques traces de phosphate, ce qui fait dire, tout au moins pour cette partie de l'océan, que le nitrate est le sel nutritif limitant de la production primaire (les silicates peuvent parfois devenir limitants dans les grands upwellings côtiers quand un bloom de diatomées de grande envergure s'est développé (HERBLAND et VOITURIEZ, 1974) ;
- la couche d'eau où le nitrate est indétectable ou à la limite de détection est en général plus épaisse que la couche homogène en phosphate ; autrement dit, la sommet de la phosphatocline se confond souvent avec celui de la thermocline (HERBLAND *et al.*, 1983) et est moins profond que le sommet de la nitracline.

Ces différences peuvent être détectées dans la relation $\text{NO}_3 = f(\text{PO}_4)$ où les valeurs de nitrate s'annulent (ou sont très proches de zéro) pour des valeurs non négligeables de phosphate.

Les données recueillies au sud d'Abidjan sont-elles conformes au schéma général du golfe de Guinée ? Comme on l'a vu plus haut, les stations où les deux sels nutritifs ont été mesurés simultanément avec une bonne précision sont rares. À partir de quelques valeurs ($n = 59$) obtenues en 1969 et 1970 avec des méthodes voisines des méthodes standard d'aujourd'hui, il ressort les résultats suivants (figure 17, tableau IV), qui concernent la station du large (24 milles) :

- bonne corrélation entre les deux sels : ($r = 0,98$ pour 1969 et 1970) ;
- pentes de 14,2 et 15,2, ce qui est voisin du rapport de REDFIELD (= 16), observé dans l'océan Atlantique tropical et ailleurs ;
- annulation du nitrate (ou presque) pour une valeur de phosphate encore très appréciable ($\text{PO}_4 - \text{P} = 0,20 \mu\text{mol/l}$) ; on peut donc penser qu'entre phosphate et nitrate, c'est le nitrate qui sera le facteur limitant.

Il est également intéressant de remarquer qu'il n'y a pas de variation saisonnière dans la relation $\text{NO}_3\text{-PO}_4$. La sélection des couples en deux groupes, novembre à mai (saison chaude) et juillet à septembre (saison froide) pour les deux années confondues 1969 et 1970, ne donne aucune différence significative entre les deux régressions (figure 18). En revanche, la relation change sur le plateau continental en période d'upwelling (figure 19). Elle est d'abord un peu moins étroite ($r = 0,94$), ce qui est le signe de phénomènes « parasites », liés à la côte ; et surtout, la pente est significativement différente (12,2 contre 14-15 dans les eaux du large). La même tendance, encore plus accentuée, a été observée dans l'upwelling sénégal-mauritanien lors d'un suivi de drogue sur des fonds de 20 à 50 m ; la pente de la droite $\text{NO}_3 = f(\text{PO}_4)$ étant voisine de 10-11 (HERBLAND *et al.*, 1983).

Discussion - Conclusions

Très peu de travaux ont été publiés sur la distribution et le rôle des sels nutritifs sur le plateau continental ivoirien. Les seules références sont celles de VARLET (1954, 1958) qui avait abouti aux conclusions suivantes (*cf.* Annexe) :

- 1° l'ouverture du canal de Vridi s'est traduite par un accroissement considérable de la teneur en silice, (contenue dans les eaux lagunaires) et une diminution de la teneur en phosphate ;

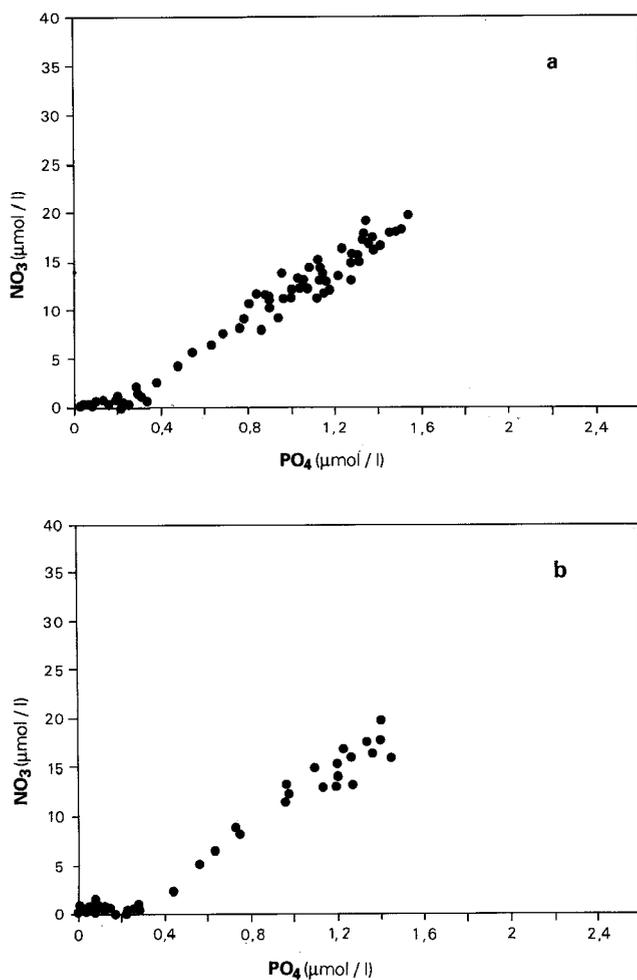


Figure 17
Relation $\text{NO}_3 = f(\text{PO}_4)$,
station 24 milles de la radiale de
Grand-Bassam, 1969 a) et 1970 b).

TABLEAU IV
Relations $\text{NO}_3 = f(\text{PO}_4)$ (en $\mu\text{mol/l}$)

Station à 24 milles			
1969	$\text{NO}_3 = 14,2 \text{ PO}_4 - 2,4$	$r^2 = ,96$	$n = 59$
1970	$\text{NO}_3 = 15,2 \text{ PO}_4 - 3,2$	$r^2 = ,97$	$n = 25$
novembre à mai {1969 + 1970}	$\text{NO}_3 = 14,6 \text{ PO}_4 - 2,6$	$r^2 = ,97$	$n = 54$
juillet à septembre (1969 + 1970)	$\text{NO}_3 = 14,4 \text{ PO}_4 - 2,6$	$r^2 = ,93$	$n = 30$
Radiale Bassam, fonds de 15-30-50 m			
juin à septembre (1969)	$\text{NO}_3 = 12,2 \text{ PO}_4 - 1,4$	$r^2 = ,88$	$n = 58$

Figure 18
 Relation $\text{NO}_3 = f(\text{PO}_4)$, station 24 milles de la radiale de Grand-Bassam (1969 et 1970) : a) saison chaude (novembre à mai) ; b) saison d'upwelling (juillet à septembre). Il n'y a pas de différence significative des relations pour les valeurs de $\text{PO}_4 > 0.2 \mu\text{mol/l}$.

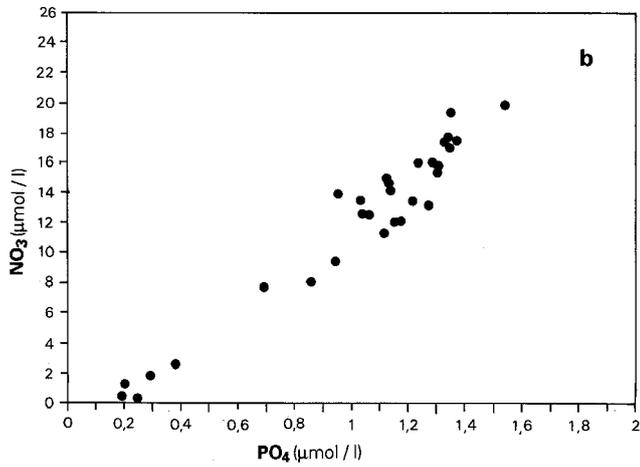
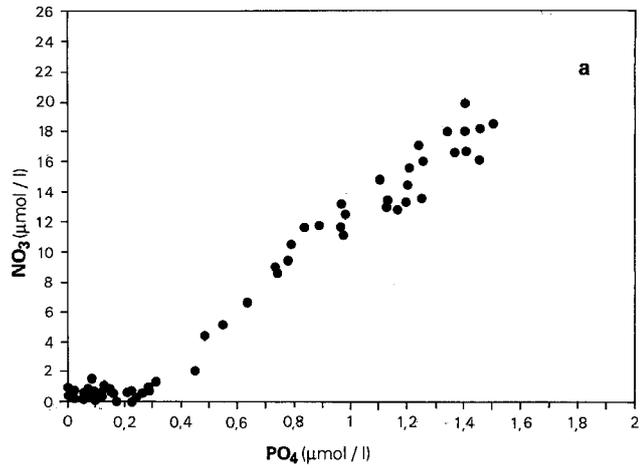
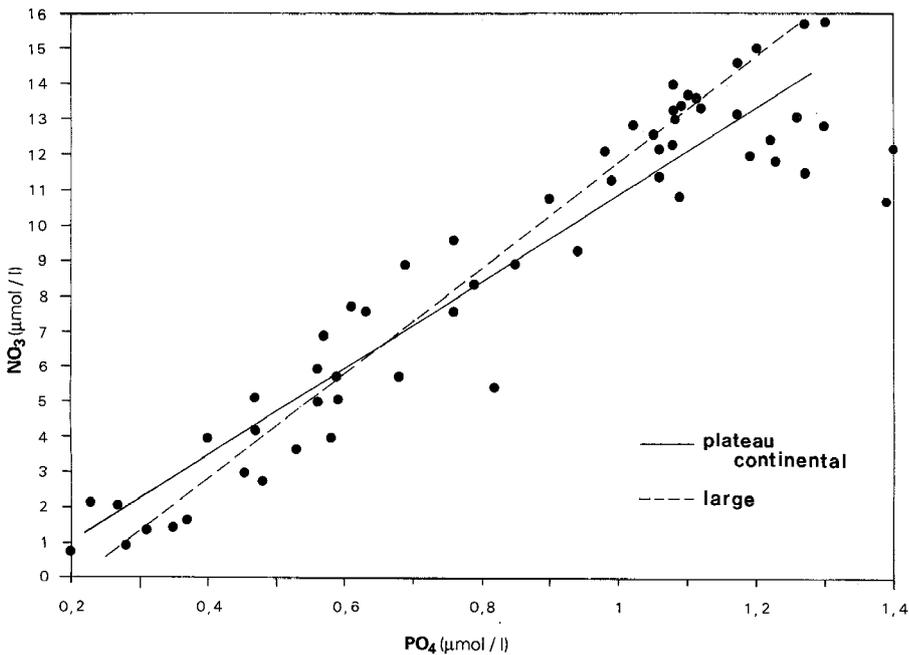


Figure 19
 Relation $\text{NO}_3 = f(\text{PO}_4)$ sur le plateau continental pendant la saison d'upwelling (Grand-Bassam, juin à septembre 1969, fonds de 15, 30 et 50 m). La pente est significativement différente de celle obtenue au large (droite en tireté).



2° il existe un cycle annuel net des sels nutritifs : fort apport de silice et de phosphate, dans une moindre mesure, pendant la crue lagunaire d'octobre ; peu de mesures de nitrate, mais elles vont dans le sens d'un épuisement pendant la saison chaude.

L'existence en août d'un maximum de phosphate, dont la concentration croît avec la profondeur, est attribuée à la présence d'un upwelling qui amène aussi en surface le maximum de nitrite ⁽¹⁾ habituellement concentré dans la couche de discontinuité.

Avec relativement peu de mesures et de faibles précisions des concentrations, VARLET avait bien décrit le cadre. Que peut-on écrire de plus aujourd'hui, en particulier sur l'intensité et l'étendue de l'upwelling ivoirien si on le compare aux autres upwellings tropicaux ?

Les quelques éléments dont on dispose permettent de conclure que l'upwelling ivoirien est important puisque les valeurs de phosphate et probablement de nitrate, (compte tenu de la bonne relation $\text{NO}_3\text{-PO}_4$) atteintes à la station 24 milles, sont du même ordre de grandeur que celles de l'upwelling du Sénégal et de Mauritanie. Ça n'est pas étonnant puisqu'il suffit que la thermocline, bien développée en saison chaude, atteigne la surface pour que, très vite, des valeurs élevées de sels nutritifs soient mesurées. Son étendue géographique n'est pas négligeable. Les résultats extrapolés à partir des données thermiques de l'ensemble des stations côtières et ceux obtenus sur une radiale de 30 milles perpendiculaire à la côte montrent qu'il peut couvrir tout le littoral d'ouest en est et s'étendre bien au-delà du plateau continental. Cependant, c'est sur le plateau que l'enrichissement est le plus intense et qu'il dure le plus longtemps.

L'upwelling présente des fluctuations d'une année à l'autre et d'une région à l'autre. Il semble difficile de dégager une tendance, de même qu'il ne semble pas osciller régulièrement autour d'une valeur moyenne. Il serait intéressant de rechercher dans les données historiques des liaisons entre les fluctuations spatio-temporelles de l'enrichissement et celles des pêches (sardinelles, balistes...).

Les relations $\text{NO}_3\text{-PO}_4$ et NO_3 -température sont conformes à ce qui a été observé ailleurs dans le golfe de Guinée (OUDOT, 1983 ; HERBLAND *et al.*, 1983). Le rapport $\text{NO}_3\text{-PO}_4$ est voisin de 16 pour les stations du large, aussi bien en saison froide qu'en saison chaude alors qu'il est plus proche de 11-12 sur le plateau continental en saison d'upwelling. La modification de ce rapport serait le reflet, comme cela a été noté dans l'upwelling de Sénégal-Mauritanie, d'une dominance de la production photosynthétique dans l'équilibre production-reminéralisation au profit d'un certain phytoplancton (les diatomées), dont le rapport de constitution N/P serait plus proche de 8 que de 16. La conclusion est identique à propos de la relation NO_3 -température qui, quelle que soit la saison à la station du large, est la même que celle mise en évidence dans l'ensemble du golfe de Guinée (OUDOT et MORIN, 1987). Par conséquent, il semblerait que l'on puisse distinguer deux types d'enrichissement :

1° celui du large où la conservation (1) des gradients thermiques, (2) du rapport de Redfield et (3) de la relation NO_3 -température est conforme à ce qui a été observé dans la divergence équatoriale en été ; malgré un très net enrichissement en surface, la structure du réseau trophique ne serait pas bouleversée (dominance du nano- et même du picoplancton) (HERBLAND *et al.*, 1987) ;

2° celui du plateau continental, où la proximité du fond et de la côte engendre des changements dans les relations et donne naissance à un réseau trophique différent, dont la base est principalement constituée de diatomées (grosses cellules).

La distinction (hypothétique aujourd'hui) de ces deux catégories est importante car les deux « systèmes » n'ont pas les mêmes rendements vis-à-vis de la production terminale et leur importance relative, selon les années, pourrait être à l'origine de fluctuations d'abondance ou de disponibilité de la ressource dans la province océanique ivoirienne, encore aujourd'hui inexplicables.

⁽¹⁾ Nous n'avons pas parlé du nitrite dans cette étude car son origine et son rôle dans les processus d'enrichissement sont incertains.

- BANSE (K.), 1974.— The nitrogen to phosphorus ratio in the photic zone of the sea and the elemental composition of the plankton. *Deep-Sea Res.*, 21 : 767-771.
- BIEFANG (P.K.), HARRISSON (P.J.), QUARMBY (L.M.), 1982.— Sinking rate response to depletion of nitrate, phosphate and silicate in four marine diatoms. *Mar. Biol.*, 67 (3) : 295-302.
- BINET (D.), 1976.— Biovolumes et poids secs zooplanctoniques en relation avec le milieu pélagique au-dessus du plateau ivoirien. *Cah. ORSTOM, sér. Océanogr.*, 14(4) : 301-326.
- BINET (D.), 1983.— Phytoplancton et production primaire des régions côtières à upwellings saisonniers dans le golfe de Guinée. *Océanogr. trop.*, 18(2) : 331-355.
- CORCORAN (E.F.) et MAHNKEN (C.V.W.), 1969.— Productivity of the tropical Atlantic Ocean. Proc. Symp. UNESCO : Oceanography and Fisheries Resources of the tropical Atlantic, Abidjan, 20-28 octobre 1966 : 57-67.
- DANDONNEAU (Y.), 1972.— Aspects principaux des variations du phytoplancton sur le plateau continental ivoirien. *Doc. Scient. Centre Rech. Océanogr. Abidjan*, 3(2) : 32-59.
- DUFOUR (P.), LEMASSON (L.), CRÉMOUX (J.L.), 1981.— Contrôle nutritif de la biomasse du seston dans une lagune tropicale de Côte-d'Ivoire. II- Variations géographiques et saisonnières. *J. exp. mar. Biol. Ecol.*, 51 : 269-284.
- DUGDALE (R.C.), 1972.— Chemical oceanography and primary productivity in upwelling regions. *Geoforn*, 11 : 47-61.
- HERBLAND (A.), LE BORGNE (R.), LE BOUTELLER (A.), VOITURIEZ (B.), 1983.— Structure hydrologique et production primaire dans l'Atlantique tropical oriental. *Océanogr. trop.*, 18 : 249-293.
- HERBLAND (A.), LE BORGNE (R.), VOITURIEZ (B.), 1973.— Production primaire, secondaire et régénération des sels nutritifs dans l'upwelling de Mauritanie. *Doc. Scient. Centre Rech. Océanogr. Abidjan*, 4(1) : 1-75.
- HERBLAND (A.), LE BOUTELLER (A.), RAIMBAULT (P.), 1987.— Does the nutrient enrichment of the equatorial upwelling influence the size? *Oceanol. Acta*, 6 (n° spécial) : 115-120.
- HERBLAND (A.) et MARCHAL (É.), 1991.— Variations locales de l'upwelling, répartition et abondance des sardinelles en Côte-d'Ivoire. In : Pêcheries ouest-africaines, variabilité, instabilité et changement, Cury (P.) et Roy (C.) éd. Paris, ORSTOM : 343-353.
- HERBLAND (A.) et VOITURIEZ (B.), 1974.— La production primaire dans l'upwelling mauritanien en mars 1973. *Cah. ORSTOM, sér. Océanogr.*, 12(3) : 187-201.
- HERBLAND (A.) et VOITURIEZ (B.), 1979.— Hydrological structure analysis for estimating the production in the tropical Atlantic Ocean. *J. Mar. Res.*, 37 : 87-101.
- HISARD (P.), 1980.— Observations de réponse de type El Niño dans l'Atlantique tropical oriental, golfe de Guinée. *Oceanol. Acta.*, 3 : 69-78.
- INGHAM (M.C.), 1970.— Coastal upwelling in the north western gulf of Guinea. *Bull. Mar. Sci.*, 20 : 1-34.
- KOLESNIKOV (A.G.), 1976.— EQUALANT 1 et 2. Oceanographic Atlas, 2, Chemical and Biological Oceanography, UNESCO, Paris.
- MANGIN (J.P.), LECOLLE (J.), MATHIEU (P.), MONNET (C.), PINTA (S.), SIRCOULON (J.), 1966.— Géochimie des eaux naturelles ; le transport en solution par un fleuve de Côte-d'Ivoire. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 262, sér. D : 2204-2206.
- MONNET (C.), 1971.— Données sur le transport en suspension par un fleuve de zone intertropicale (Bandama, Côte-d'Ivoire). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 273, sér. D : 41-44.
- MORLIÈRE (A.), 1970.— Les saisons marines devant Abidjan. *Doc. Scient. Centre Rech. Océanogr. Abidjan*, 1(2) : 1-15.

- MORLIÈRE (A.) et REBERT (J.P.), 1972.— Étude hydrologique du plateau continental ivoirien. *Doc. Scient. Centre Rech. Océanogr. Abidjan.*, 3(2) : 1-30.
- OUDOT (C.), 1983.— La distribution des sels nutritifs (NO_3 , NO_2 , NH_4 , PO_4 , SiO_3) dans l'Océan Atlantique intertropical oriental (région golfe de Guinée). *Océanogr. trop.*, 18 : 223-248.
- OUDOT (C.) et MORIN (P.), 1987.— The distribution of nutrients in the equatorial Atlantic : relation to physical processes and phytoplankton biomass. *Oceanol. Acta*, 6, (n° spécial) : 121-130.
- PAASCHE (E.), 1980.— Silicon. In : Morris (I.) ed., The physiological ecology of phytoplankton. *Studies in Ecology*, 7, Blackwell Scient. publ. : 259-284.
- PICAUT (J.), 1984.— On the dynamics of thermal variations in the gulf of Guinea (with time scales from semi-diurnal to interannual). *Océanogr. trop.*, 19 : 127-154.
- PRIVÉ (M.) et CORRE (D.), 1979.— Les stations côtières fixes de la côte ouest-africaine. Valeurs et graphiques annuels. II—côtières Côte-d'Ivoire. *Sér. Doc. Tech. ORSTOM*, BC, 2, 172 p.
- REYSSAC (J.), 1970.— Phytoplankton et production primaire au large de la Côte-d'Ivoire. *Bull. IFAN, sér. A*, 32 : 869-981.
- ROCHFORD (D.), 1947.— The preparation and use of Harvey's reduced strychnine reagent in oceanographical chemistry. Council for scientific and industrial research, *Div. Fish. Rep.*, Melbourne, 13 : 1-32.
- ROOSE (E.), 1981.— Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Paris, *Trav. Doc. ORSTOM*, 130, 569 p.
- RYTHER (J.H.) et DUNSTAN (W.N.), 1971.— Nitrogen, phosphorus and eutrophication in the coastal marine environment. *Science*, 171(3975) : 1008-1013.
- STRICKLAND (J.D.H.) et PARSONS (T.R.), 1968.— A practical handbook of seawater analysis. *Bull. Fish. Res. Bd. Canada*, 167, 311 p.
- VARLET (F.), 1954.— Le régime de l'Atlantique près d'Abidjan (Côte-d'Ivoire). Essai d'océanographie littorale. ORSTOM, *Océanogr. phys.*, cote 1788, 107 p., 43 fig.
- VARLET (F.), 1958.— Les traits essentiels du régime côtier de l'Atlantique près d'Abidjan (Côte-d'Ivoire). *Bull. IFAN, sér. A*, 20(4) : 1089-1102.
- VOITURIEZ (B.) et HERBLAND (A.), 1984.— Signification de la relation NO_3 -température dans l'upwelling équatorial du golfe de Guinée. *Oceanol. Acta*, 7(2) : 169-174.
- WALSH (J.J.), KELLY (J.C.), DUGDALE (R.C.), FROST (B.W.), 1971.— Gross features of the peruvian upwelling system with special reference to possible diel variation. *Inv. Pesq.*, 35 : 25-42.
- WATTENBERG (H.), 1937.— Critical review of the methods used for determining nutrient salts and related constituents in salt water. I-Methoden zur Bestimmung von Phosphat, Silikat, Nitrat und Ammoniak in Seewasser. *Cons. Perm. Intern. Explor. Mer, Rapp. Proc. Verb.*, C III : 1-26.

Annexe

Extrait de VARLET (F.), 1958. Les traits essentiels du régime côtier de l'Atlantique près d'Abidjan (Côte d'Ivoire). *Bulletin de l'IFAN, sér. A*, 20(4) : 1089-1102.

Les sels nutritifs (en surface, à Port-Bouët)

Les interprétations que nous présentons doivent être considérées uniquement comme des hypothèses de travail. Depuis l'ouverture du canal de Vridi, les faits essentiels semblent être :

- accroissement considérable de la teneur en silice ; la silice est apportée par les eaux lagunaires qui contiennent 5 à 8 mg de Si par litre. La silice se trouve désormais en quantité surabondante alors qu'elle était auparavant un facteur limitant le développement du phytoplancton ;
- diminution marquée de la concentration en phosphates ; tout se passe comme si les réserves de phosphates, jadis surabondantes, étaient maintenant complètement utilisées ;
- l'ouverture du canal de Vridi, si elle a modifié les valeurs absolues des concentrations des sels nutritifs, n'a, par contre, pas beaucoup influé sur l'allure des cycles annuels ; on peut donc penser que l'évolution de phénomènes biologiques n'est pas irrémédiablement masquée par les apports massifs d'eau lagunaire.

Cycles annuels des sels nutritifs

Il se produit, pendant la crue lagunaire d'octobre, un apport très important de silice, et, dans une moindre mesure, de phosphates. Ces réserves se trouvent alors progressivement utilisées pendant la saison sèche jusqu'en avril. On observe ensuite une augmentation assez lente, puis plus rapide, jusqu'au maximum d'octobre.

Nous n'avons pas beaucoup de mesures sur les nitrates, mais elles confirment l'épuisement de la mer en saison sèche.

En ce qui concerne les nitrites, nous noterons seulement que l'augmentation des apports d'eau lagunaire se traduit par une augmentation de leur concentration : par suite de l'afflux des matières organiques azotées contenues dans les eaux de lagune, les bactéries n'arrivent plus à réaliser la transformation rapide de ces matières en nitrates (stade ultime de la minéralisation), et il y a apparition d'un stade intermédiaire sous forme de nitrites. Les nitrites, eux aussi, présentent un minimum accentué en avril, mais l'interprétation en est difficile.

Sels nutritifs et remontées d'eau

Bien qu'il y ait interférence avec d'autres phénomènes, l'existence d'un maximum en août pour les phosphates dont la concentration croît avec la profondeur, paraît assez significative. On n'observe rien de tel avec la silice dont la concentration augmente peu avec la profondeur et reste toujours très inférieure aux concentrations qu'on trouve dans les eaux lagunaires. Mais le test le plus sensible est fourni par les nitrites qui sont, nous le verrons, concentrés dans la couche de discontinuité à quelques

dizaines de mètres de profondeur. Les upwellings doivent donc les faire apparaître en surface, et l'on constate effectivement que les maxima des nitrites, avant l'ouverture du canal de Vridi, se situent bien en janvier et en août.

Répartition verticale des sels nutritifs (Trou-sans-Fond)

Phosphates : malgré la différence des valeurs absolues, l'allure des deux profils dont nous disposons est assez semblable, et conduit à distinguer :

- une couche superficielle d'épaisseur variable suivant l'époque de l'année, où la teneur en phosphates croît assez rapidement ; cette couche n'est autre que la zone de grande stabilité précédemment étudiée ;
- une couche intermédiaire épaisse de 300 m environ, où la concentration en phosphates augmente lentement avec la profondeur ;
- une couche profonde, dont nous n'avons atteint que la partie supérieure, caractérisée par une grande richesse en phosphates.

On montre que cette répartition peut s'expliquer, au moins en partie, par des considérations simples sur l'activité biologique.

Nitrites : on ne les trouve qu'au voisinage de la surface de discontinuité. On peut se demander s'il ne faut pas rechercher une explication analogue à celle de la diminution rapide de la teneur en oxygène dans la couche de forte stratification densimétrique : ralentissement de la chute des débris organiques qui s'accumulent en quelque sorte dans cette zone et ne peuvent plus être transformés rapidement en nitrates par les bactéries.