

5 • Les sels nutritifs au voisinage de Dakar : cycle annuel moyen et variabilité interannuelle

CLAUDE OUDOT

Océanographe ORSTOM - ORSTOM, BP 1386, Dakar, Sénégal

CLAUDE ROY

Océanographe ORSTOM - CRODT/ISRA, BP 2241, Dakar, Sénégal

RÉSUMÉ

Des observations hebdomadaires réalisées de 1985 à 1989 à partir du rivage dans une zone d'upwelling côtier (presqu'île du cap Vert au Sénégal) permettent de décrire les fluctuations saisonnières et interannuelles des composantes physico-chimiques de l'écosystème. L'accroissement important des teneurs en sels minéraux observé de janvier à avril correspond à l'étalement des eaux froides issues de la résurgence. Le cycle saisonnier de la chlorophylle présente une structure bimodale avec un maximum principal en fin d'upwelling (avril) et un maximum secondaire au quatrième trimestre au début de la période de refroidissement. Ces mesures côtières constituent un outil approprié pour une surveillance en continu d'un écosystème tel qu'un upwelling côtier; elles permettent d'appréhender la variabilité des apports en éléments nutritifs en réponse aux fluctuations d'intensité de la résurgence.

ABSTRACT

Weekly sampling of the coastal waters in an upwelling area (the Cap-Vert peninsula off Senegal) gives an overview of the inter-annual and seasonal variability of the physical and chemical ecosystem components. The sharp increase of nutrients concentration from January to April is the chemical signature of the enrichment by the upwelled waters. The chlorophyll seasonal cycle has a bimodal structure with a maximum at the end of the upwelling season and a secondary peak in the 4th quarter during the beginning of the upwelling season. These coastal samplings are adapted for a long term survey of a coastal upwelling ecosystem. These measurements give an overview of the nutrients inputs variability into the ecosystem in response to the upwelling fluctuations.

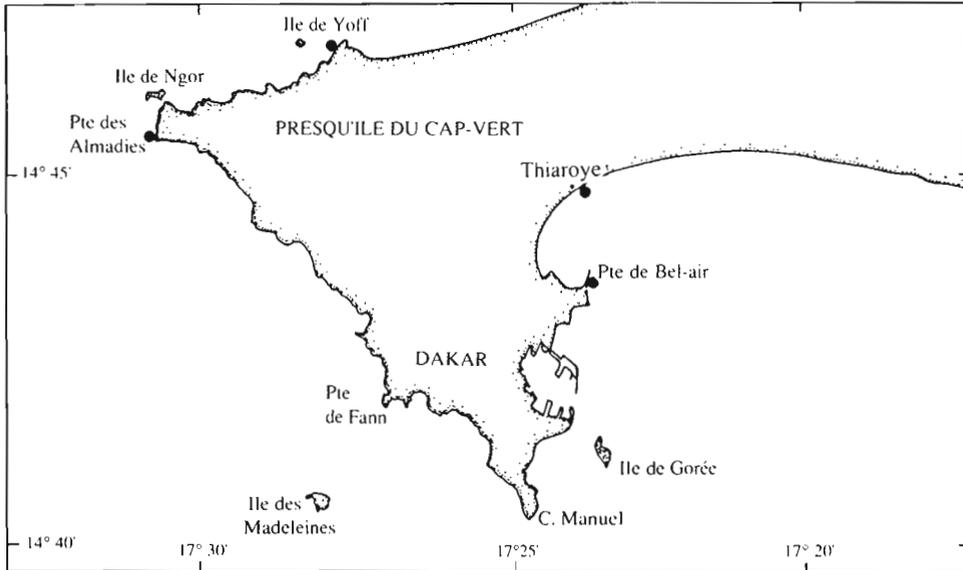
INTRODUCTION

Dans le cadre d'une étude de la variabilité inter et intra-annuelle des paramètres physico-chimiques intervenant dans le cycle du CO₂, le groupe PIRAL (ORSTOM/Dakar) a réalisé des mesures de température, salinité, oxygène et sels nutritifs (nitrate, nitrite et phosphate) sur des échantillons d'eau de mer collectés en plusieurs points du rivage autour de la presqu'île du Cap-Vert. Ces observations hebdomadaires, démarrées en février 1985, constituent aujourd'hui une série continue d'observations et permettent de définir pour chacun des paramètres un cycle annuel moyen. Ces différentes séries permettent également d'illustrer la variabilité interannuelle des apports en sels minéraux au cours des saisons d'upwelling de 1985 à 1989.

Les modèles de dynamique des populations utilisés pour étudier les effets de la variabilité hydroclimatique sur les stocks pélagiques en Afrique de l'Ouest supposent une corrélation étroite entre l'intensité de

Fig. 1

Localisation des points de prélèvements hebdomadaires sur le pourtour de la presqu'île du Cap-Vert.



l'upwelling, les apports en sels minéraux et finalement la production (Fréon, 1984; Cury et Roy, 1987; Mendelssohn et Cury, 1987). A l'aide des données présentées ici, la validité de ces relations sera examinée, notamment pour les deux premières d'entre-elles.

MÉTHODES D'OBSERVATIONS ET REPRÉSENTATIVITÉ DES MESURES

Une fois par semaine (même jour, même heure), de l'eau de mer de surface est prélevée sur le rivage à l'aide d'un seau en quatre points autour de Dakar: Yoff, Pointe des Almadies, Thiaroye et Bel-Air (fig. 1). Les échantillons récoltés sont analysés le plus souvent dès le retour au laboratoire, c'est-à-dire au plus tard 3 heures après le prélèvement suivant les méthodes classiques utilisées en chimie marine et rappelées par Oudot (1987). Pendant certaines périodes, les dosages ont été différés après empoisonnement des échantillons par du chlorure mercurique (HgCl_2).

La première question à laquelle il nous faut répondre est la représentativité de ces prélèvements côtiers. Sont-ils soumis à des pollutions littorales (rejets domestiques, industriels)? Quelle est l'importance des échanges avec les sédiments? Un diagramme de corrélation entre les teneurs en nitrate (NO_3) et phosphate (PO_4) enregistrées aux différents points de prélèvement constitue un premier test de la qualité et de la cohérence des échantillons récoltés. En effet, les variations de la teneur de ces deux éléments au sein de l'océan se font toujours dans un

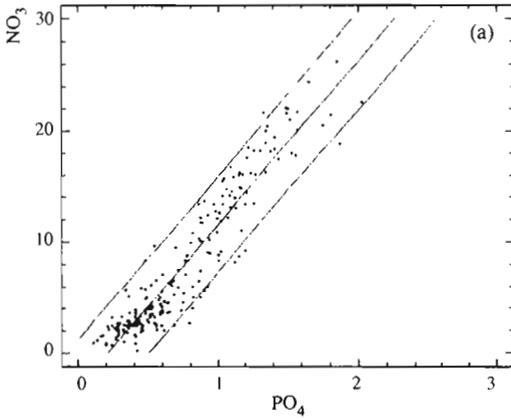
rapport constant, voisin de la composition moyenne du plancton en azote et phosphore ($\text{N/P}=16$). Une pente de la droite de régression NO_3/PO_4 qui s'éloigne de cette valeur sera donc l'indice d'une contamination des échantillons par des facteurs externes. A la station de Yoff, la pente de la droite de régression entre nitrate et phosphate est égale à 14,7; cette régression linéaire permet d'expliquer 88% de la variance (fig. 2-a). La relation entre nitrate et phosphate à la station de Yoff semble correspondre au schéma rencontré dans des structures océaniques classiques; cette relation est similaire à celle obtenue à partir de données récoltées lors de campagnes océanographiques devant le Sénégal en saison d'upwelling (fig. 2-c). Par contre, dans la baie de Hann (station de Thiaroye), on observe une forte dispersion des points (fig. 2-b): ce diagramme illustre les effets de la pollution urbaine de la baie de Hann et de l'eutrophisation qui en résulte. Dans la suite de cette étude, nous nous limiterons donc à la présentation des résultats de la station de Yoff où les observations semblent se rapprocher le plus des conditions sur le plateau continental.

CYCLES ANNUELS MOYENS

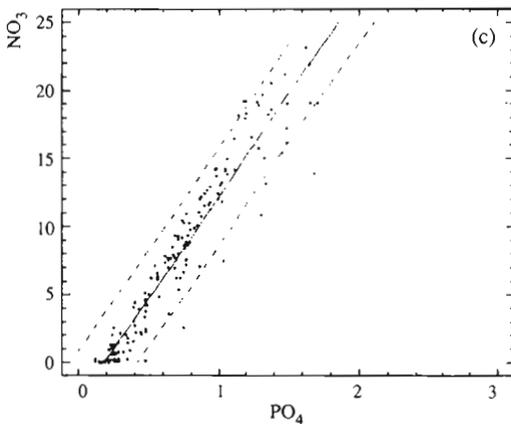
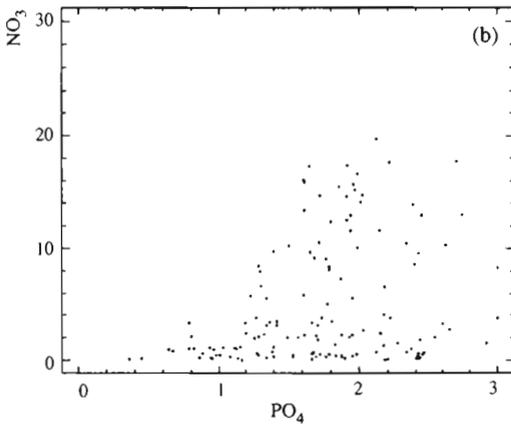
A partir des observations hebdomadaires, les moyennes mensuelles de février 1985 à mai 1989 de la température, de la salinité, des teneurs en nitrate et en chlorophylle ont été calculées (fig. 3-a, b). L'énergie transférée par le vent à la colonne d'eau est estimée à l'aide de deux

Fig. 2

Diagramme de corrélation nitrate-phosphate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$) aux stations côtières de: (a) Yoff, (b) Thiarye (1985-1989), (c) sur le plateau continental (campagnes CIRSEN-CRODT, 1986-1988).



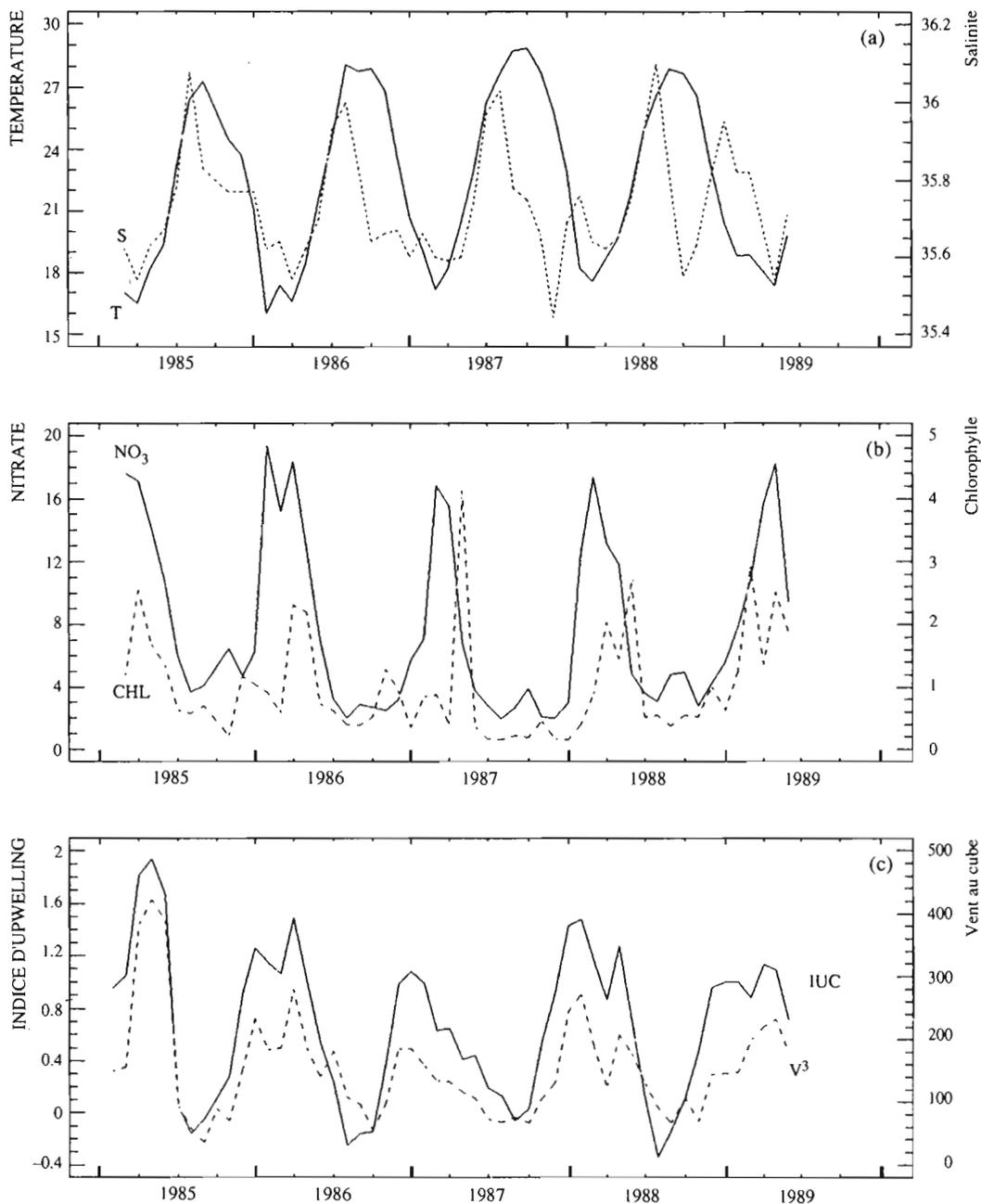
	Estimation	Erreur standard	T	
Ordonnée	-3,09	0,31	-9,88	0,00
Pente	14,69	0,36	39,97	0,00
Coefficient de corrélation = 0,94		R-carré = 88,39 %		
Nombre de point = 211				



	Estimation	Erreur standard	T	
Ordonnée	-2,75	0,26	-10,58	0,00
Pente	14,95	0,33	44,86	0,00
Coefficient de corrélation = 0,96		R-carré = 92 %		
Nombre de point = 174				

Fig. 3

Moyennes mensuelles de 1985 à 1989: (a) de la température ($^{\circ}\text{C}$) et de la salinité; (b) du nitrate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$) et de la chlorophylle ($\mu\text{g.l}^{-1}$) à la station côtière de Yoff. (c) de l'IUC ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}.\text{m}^{-1}$) et du brassage par le vent ($\text{m}^3.\text{s}^{-3}$) d'après les données de vent de la station météorologique de l'aéroport de Dakar-Yoff.



indices: le premier, calculé à partir de la composante normale à la côte du transport d'Ekman, est un Indice de l'intensité d'un Upwelling Côtier (IUC) (Bakun, 1973); le second, obtenu à partir de la vitesse du vent au cube, est un estimateur du brassage vertical (fig. 3-c). Ces deux indices ont été calculés à partir des mesures tri-horaires de vent réalisées à la station météorologique de l'aéroport de Dakar-Yoff. Pour chacun de ces paramètres, une forte périodicité annuelle se dégage des observations réalisées depuis février 1985. Ce sera le premier point que nous allons aborder.

Le cycle annuel moyen de la température de surface de la mer à Yoff montre que l'amplitude saisonnière est en moyenne supérieure à 10°C, les plus fortes températures sont rencontrées en septembre pendant la saison chaude et humide, les plus faibles sont rencontrées en février-mars pendant la saison d'upwelling (fig. 4-a). La température de surface de la mer chute à partir du mois d'octobre, se stabilise entre 17°C et 18°C au cours du premier trimestre et croît ensuite régulièrement du mois d'avril à juillet pour atteindre 28°C en septembre (fig. 4-a); La salinité suit un schéma sensiblement identique (fig. 4-a), on note cependant une dessalure importante ($S < 35,7‰$) des eaux de surface à partir du mois d'août due à l'advection d'eaux guinéennes et aux pluies de la saison humide (Rossignol et Aboussouan, 1965; Rébert, 1983). Pendant la saison d'upwelling, la salinité est basse et se stabilise entre 35,5 et 35,7‰. A la fin de l'upwelling, la salinité augmente; des eaux tropicales chaudes et salées ($T > 25°C$, $S > 35,9‰$) envahissent le plateau continental jusqu'au mois de juillet, pour ensuite être remplacées par des eaux dessalées (Rossignol et Aboussouan, 1965; Rébert, 1983).

L'IUC estime la quantité d'eau déplacée vers le large par le vent, c'est un indice couramment utilisé pour estimer l'intensité d'un upwelling (Bakun, 1973). Les valeurs les plus élevées sont observées pendant la période d'upwelling, de décembre à mai (fig. 4-e). On note que cet indice reste élevé jusqu'au mois de mai alors que la température s'accroît dès le mois d'avril (fig. 4-a). De décembre à avril, l'IUC reste supérieur à $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Le cycle annuel moyen du nitrate est en opposition de phase avec celui de la température (fig. 4-b). Les plus fortes concentrations de nitrate (plus de $16 \mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$) sont observées entre le mois de février et le mois de mars pendant la saison d'upwelling et les plus faibles ($< 3 \mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$) de juin à novembre dans les eaux chaudes. L'amplitude annuelle moyenne dépasse $13 \mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$. Les concentrations de nitrate ne sont jamais nulles, les plus faibles valeurs restant voisines de $3 \mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ pendant la saison chaude. Ceci peut paraître surprenant car l'eau de mer de surface dans les régions tropicales, en dehors des zones d'upwelling, est épuisée en nitrate. Cet excès de nitrate reste cependant compatible avec les teneurs en phosphate observées simultanément (fig. 2-a), le rapport entre ces deux composés étant voisin de celui de la composition du plancton ($N/P=16$). En saison chaude, les sels minéraux mesurés dans l'eau circulant sur le rivage sont vraisemblablement le résultat de la diffusion turbulente à partir des sédiments, la couche d'eau

échantillonnée lors des prélèvements ne dépassant pas en effet 1 à 2 mètres de profondeur suivant la marée. La baisse importante de température à partir du mois d'octobre n'est pas accompagnée de l'accroissement attendu de nitrate (fig. 4-b). Ce déficit apparent en nitrate peut être la conséquence de l'advection d'eau froide déjà épuisée en éléments minéraux ou d'une consommation sur place de ces mêmes éléments par le phytoplancton. L'examen du cycle annuel moyen de la chlorophylle pourra nous apporter des éléments de réponse.

Le cycle annuel moyen du phosphate est en tout point comparable à celui du nitrate (fig. 4-d); les plus fortes teneurs ($> 1,2 \mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$) sont observées en période d'upwelling et les plus faibles en saison chaude ($< 0,5 \mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$). On note également des teneurs en phosphate non nulles dans les eaux chaudes, signe d'un enrichissement des eaux du rivage à partir des sédiments.

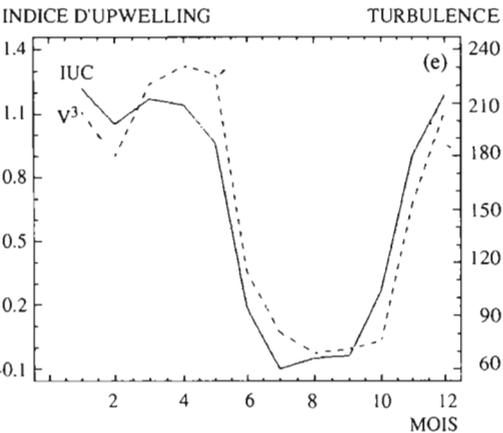
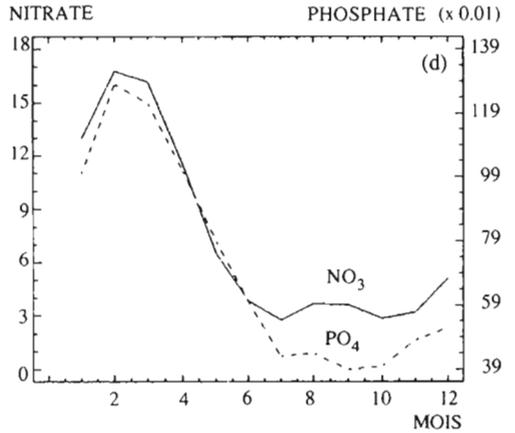
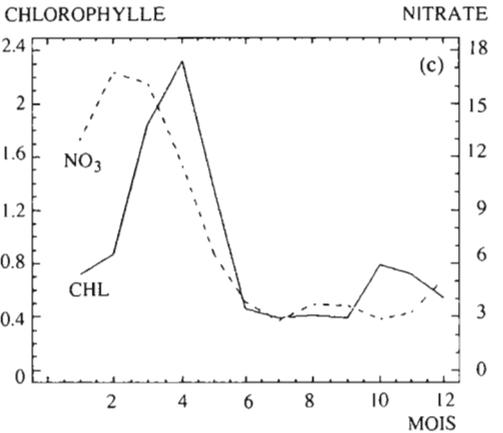
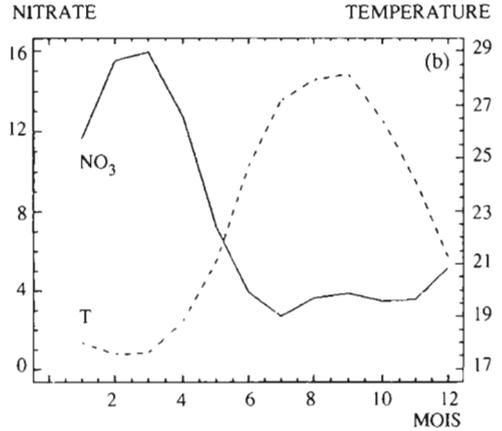
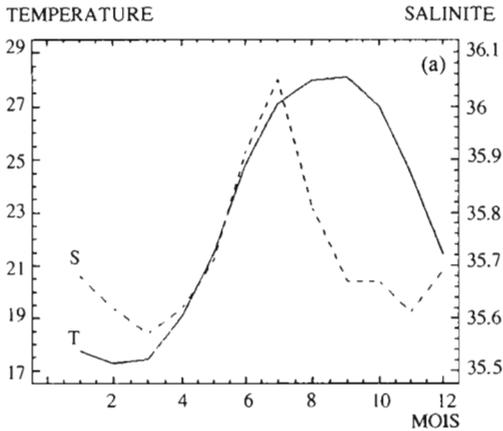
Le cycle annuel moyen de la chlorophylle (fig. 4-c) présente une structure bimodale avec un premier pic en avril et un pic secondaire d'octobre à novembre. En saison d'upwelling, il existe un décalage d'environ deux mois entre le pic de nitrate associé aux eaux froides (février-mars) et celui de chlorophylle (avril) (fig. 4-c). A la côte, le développement maximum du phytoplancton ne correspond pas à la période où les plus fortes teneurs en éléments minéraux sont observées. Ce décalage pourrait être la simple conséquence de la consommation des sels minéraux par le phytoplancton. Cependant au cours du mois d'avril, l'intensité de l'upwelling commence à décroître, la température s'accroît et l'apport de nitrate par l'upwelling diminue. Le développement du phytoplancton n'explique pas à lui seul la baisse du nitrate en avril-mai qui est le reflet de la relaxation de la résurgence. En février-mars, l'intensité de l'upwelling est maximale, la dérive rapide des eaux superficielles vers le large s'oppose au développement du phytoplancton à la côte. A partir du mois d'avril, la décroissance du transport d'Ekman (fig. 4-e) se traduit par une dérive moins rapide des eaux superficielles et un accroissement de la stabilité verticale, permettant cette fois un développement à la côte du phytoplancton. Le pic secondaire de chlorophylle en fin d'année est sans doute la cause du déficit apparent du nitrate observé au cours de la même période (fig. 4-c). L'upwelling démarre en novembre et le phytoplancton bénéficie de l'apport en sels minéraux pour se développer simultanément. L'intensification de l'upwelling au cours du premier trimestre détruit la stabilité verticale (fig. 4-e) et limite le développement du phytoplancton malgré les apports importants de sels nutritifs.

L'étude du cycle moyen annuel de la température, des sels minéraux et de la chlorophylle nous a montré que sur la bordure littorale de la presqu'île du Cap-Vert:

- les températures les plus faibles sont observées en période d'upwelling de novembre à mai;
- l'upwelling entraîne un accroissement très important des teneurs en sels minéraux de la zone côtière;
- le cycle du phytoplancton est déphasé par rapport à

Fig. 4

Cycles moyens mensuels sur la période 1985-1988 à Yoff: (a) de la température ($^{\circ}\text{C}$) et de la salinité (‰); (b) de la température ($^{\circ}\text{C}$) et du nitrate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$); (c) de la chlorophylle ($\mu\text{g.l}^{-1}$) et du nitrate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$); (d) du nitrate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$) et du phosphate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$), (e) de l'IUC ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}.\text{m}^{-1}$) et du brassage par le vent ($\text{m}^3.\text{s}^{-3}$).



celui de la température et du nitrate dans la bordure littorale; l'abondance du phytoplancton à la côte, estimée par la teneur en chlorophylle, malgré un léger accroissement en début de saison froide, reste faible pendant la pleine saison d'upwelling et est maximale en fin de saison froide;

- en saison chaude, la diffusion turbulente à partir des sédiments entraîne dans la zone littorale un enrichissement significatif de la colonne d'eau en sels minéraux.

VARIABILITÉ INTER-ANNUELLE

Les prélèvements hebdomadaires réalisés à Yoff depuis février 1985 permettent d'analyser la variabilité interannuelle des apports en sels minéraux et d'aborder celle de la production phytoplanctonique au cours des saisons d'upwellings qui se sont succédées au cours des cinq années d'observations.

Les écarts entre la série temporelle 1985-1989 (moyennes mensuelles) et le cycle moyen annuel pour la température, le nitrate et la chlorophylle (fig. 5-a, b, c) permettent, pour chacun de ces paramètres, de distinguer deux années aux caractéristiques opposées. L'année 1985 est caractérisée par des températures situées en dessous de la courbe moyenne et des teneurs en nitrate toujours supérieures à la moyenne (fig. 5-a, b). La situation observée au cours de l'année 1987 est l'inverse de celle constatée en 1985: les températures rencontrées sont plus élevées et les teneurs en nitrate plus faibles que la moyenne, notamment pendant la période d'upwelling de décembre 1986 à mai 1987 (fig. 5-a, b). Pendant la saison d'upwelling 1985-1986, les températures et les teneurs en nitrate sont proches de la moyenne en début et en fin d'upwelling; au cours du premier trimestre, les températures inférieures à la moyenne illustrent une intensification de la résurgence qui se traduit également par un accroissement des apports en nitrate. L'année 1988 est proche du schéma moyen. La caractéristique principale de l'upwelling de 1988-1989 est la faible intensité de la remontée en début de saison froide, suivie par une intensification notable à la fin du premier trimestre. La variabilité interannuelle de la chlorophylle est plus difficile à interpréter (fig. 5-c). En 1987, bien que le pic de chlorophylle observé en avril soit le plus fort de toute la série, les valeurs observées de part et d'autre de ce maximum sont inférieures à celles du cycle moyen. A partir de ces figures, il est possible de classer les saisons d'upwelling observées de 1985 à 1989 de la façon suivante:

- 1985 et 1986: upwelling fort (température et teneur en nitrate respectivement inférieure et supérieure à la moyenne pendant la saison d'upwelling);

- 1988 et 1989: upwelling d'intensité moyenne;

- 1987: upwelling faible (température plus élevée, et teneur en sels minéraux plus faible que la moyenne).

Pour illustrer cette variabilité interannuelle, les moyennes par saison d'upwelling, de janvier à mai, pour les différents paramètres ont été calculées. Bien qu'il soit présomptueux de tirer des conclusions à partir de cinq

années d'observations, nous allons examiner les relations qui existent entre les différents paramètres moyennés par saison d'upwelling. La température et l'IUC sont utilisés comme des indicateurs de l'intensité de l'upwelling: à un upwelling fort (faible) correspondent des températures basses (élevées) et des valeurs d'IUC fortes (faibles) (fig. 6-a). A des upwellings forts (faibles) correspondent des vitesses de vent élevées et un brassage important (faible) (fig. 6-b). La teneur moyenne en nitrate pendant la saison froide est inversement proportionnelle à l'intensité de l'upwelling estimée par la température: plus l'upwelling est fort plus la teneur moyenne en nitrate est élevée (fig. 6-c). Une relation similaire est obtenue à partir de l'indice d'upwelling avec cependant une dispersion plus importante des points (fig. 6-d). Par contre, il ne semble pas y avoir de relation simple entre la teneur moyenne en chlorophylle et l'intensité de l'upwelling estimée à partir de la température ou de l'IUC (fig. 6-e, f). Ces résultats ne permettent cependant pas de conclure à une absence de relation entre intensité de l'upwelling et teneur en chlorophylle. En effet, une seule mesure hebdomadaire de chlorophylle, réalisée en un seul point à la côte, ne peut être représentative des processus biologiques qui se développent sur le plateau tels que la dynamique du phytoplancton, la distribution spatiale de la chlorophylle étant par nature très hétérogène.

CONCLUSION

Des observations hebdomadaires réalisées à partir du rivage dans une zone d'upwelling constituent un moyen simple et peu onéreux d'assurer une surveillance continue de l'écosystème. Les résultats obtenus à la station de Yoff sont cohérents avec des mesures effectuées au large lors de campagnes océanographiques et permettent ainsi d'étudier à court, moyen et long terme la variabilité de l'écosystème. Ce type de mesures constitue un outil adapté à des études halieutiques qui nécessitent de plus en plus souvent de connaître la variabilité de l'environnement et d'intégrer dans les modèles des paramètres décrivant cette variabilité.

REMERCIEMENTS

Cette étude a pu être réalisée grâce au soutien financier de l'ORSTOM pour l'acquisition des données et à la collaboration du CRODT/ISRA pour assurer la continuité des prélèvements des échantillons d'eau de mer. Pour leur aide précieuse, tant au niveau des prélèvements que des mesures, nous tenons à remercier E. Fukai, R. Gérard, P. Lamour, Y. Montel, P. Morin et J. Pages.

Fig. 5

Moyennes mensuelles (—) et cycles annuels moyens (-----), à la station côtière de Yoff de 1985 à 1989:
(a) de la température (°C), (b) du nitrate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$) et
(c) de la chlorophylle ($\mu\text{g.l}^{-1}$).

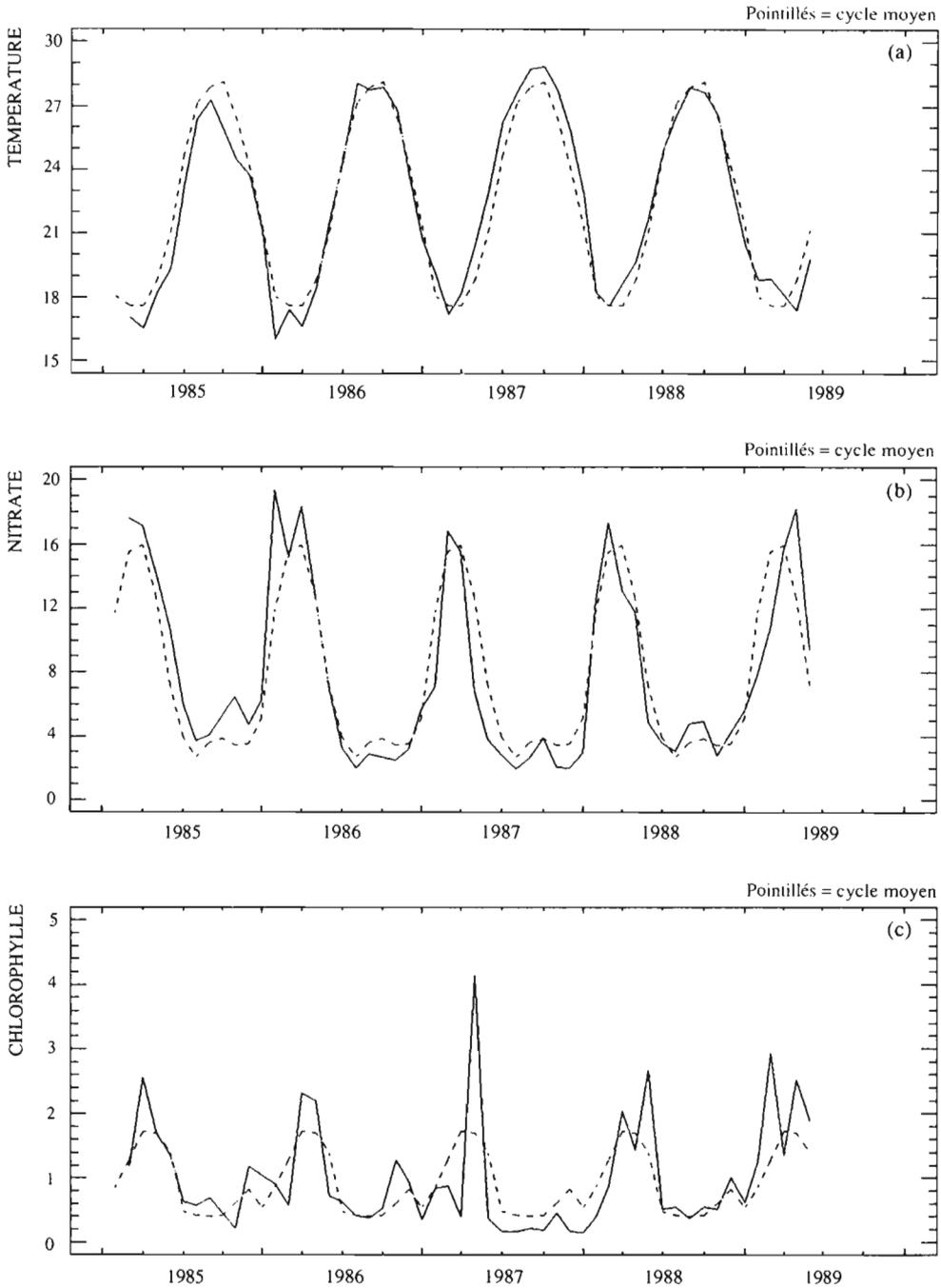
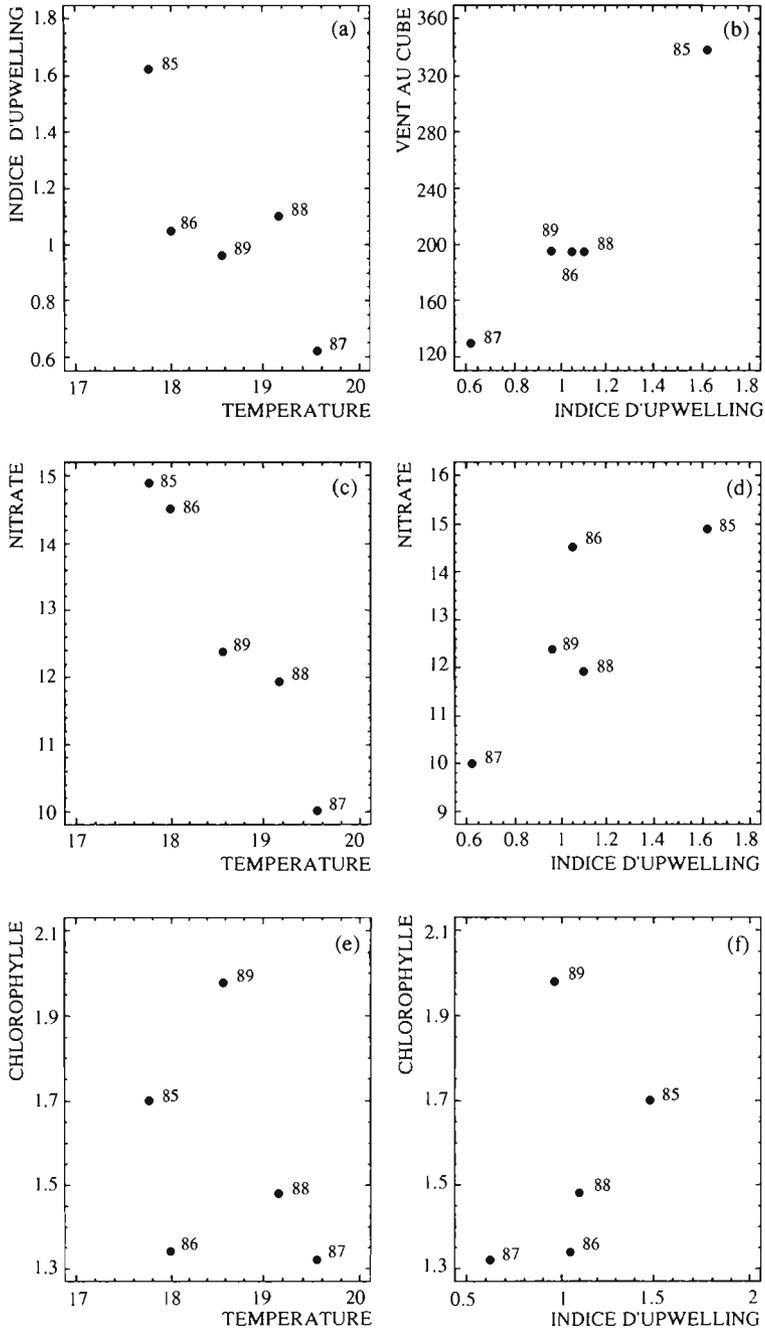


Fig. 6

Relation entre: (a) température et IUC, (b) vent au cube et IUC, (c) nitrate et température, (d) nitrate et IUC, (e) chlorophylle et température, (f) chlorophylle et IUC. (Valeurs moyennes en saison d'upwelling, de janvier à mai, pour la période 1985-1989).



BIBLIOGRAPHIE

- Bakun A. 1973. Daily and weekly upwelling indices, West Coast of north America 1946-71. U.S. Dep. Comm., NOAA Tech. Rep. NMFS SSRF-671, 103p.
- Cury P. et C. Roy. 1987. Upwelling et pêche des espèces pélagiques côtières de Côte-d'Ivoire: une approche globale. *Oceano. Acta.*, 10, 3, 347-357.
- Fréon P. 1984. Des modèles de production appliqués à des fractions de stock dépendants des vents d'upwelling (pêche sardinière au Sénégal). *Océanogr. Trop.*, 19 (1), 67-94.
- Mendelssohn R. et P. Cury. 1987. Fluctuations of a fortnightly abundance index of the Ivoirian coastal pelagic species and associated environmental conditions. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, Vol. 44, 408-421.
- Oudot C. 1987. Observations physico-chimiques et biomasse végétale dans l'océan Atlantique équatorial. Atlas FOCAL, vol. 2 (PIRAL), Trav. Doc. ORSTOM, 209, 215p.
- Rébert J. P. 1983. Hydrologie et dynamique des eaux du plateau continental sénégalais. Doc. Scient. Centre Rech. Océanogr., Dakar-Thiaroye, 93, 186p.
- Rossignol M. et Aboussouan M. T. 1965. Hydrologie marine côtière de la presqu'île du Cap-Vert. Contribution à l'étude de la productivité des eaux. Publ. prov. ORSTOM, 166p.