

13 • La variabilité des relations nitrate-température et nitrate-phosphate dans l'upwelling sénégalais

CLAUDE ROY

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

CLAUDE OUDOT

Océanographe ORSTOM, ORSTOM, BP 1386, Dakar, Sénégal

RÉSUMÉ

La variabilité interannuelle des relations NO_3/T et NO_3/PO_4 dans l'upwelling sénégalais est étudiée à partir de deux jeux de données: des prélèvements hebdomadaires à une station côtière et des données synoptiques de surface prélevées lors de campagnes océanographiques. Des différences significatives apparaissent d'une année à l'autre entre les pentes des droites de régression NO_3/T et NO_3/PO_4 . Ces différences sont interprétées comme des modifications des mécanismes de production. Quelques processus physiques ou biologiques pouvant contribuer à ces modifications des pentes des droites de régression sont proposés. La comparaison entre les données de la station côtière et celles des campagnes océanographiques suggère qu'il existe des différences significatives entre les processus se développant dans l'espace sur l'ensemble du plateau et ceux se déroulant dans le temps en un point fixe à la côte.

ABSTRACT

The interannual variability of the NO_3/T and NO_3/PO_4 relationship in the Senegalese upwelling is investigated from two different data sets: weekly samples at a coastal station and surface synoptic data from oceanographic cruises. From one year to another, significant differences exist between the slope of the NO_3/T and NO_3/PO_4 regressions. These differences are interpreted as an alteration of the production processes. Different physical or biological processes are proposed to explain these differences. The comparison between the results at the coastal station data and those given by the oceanographic cruises data shows significant differences between the spatial processes acting on the continental shelf and the temporal processes occurring at a coastal station.

INTRODUCTION

La caractéristique majeure d'un upwelling est la résurgence en surface d'eaux froides possédant de fortes teneurs en éléments minéraux. Ces éléments nutritifs sont consommés par les premiers maillons de la chaîne trophique et sont à l'origine de la forte productivité biologique des zones d'upwelling. Des interactions existent entre les processus physiques, chimiques et biologiques mis en jeu dans les mécanismes de production. Elles sont illustrées par des relations, parfois linéaires, entre des paramètres de nature différente (température, sels nutritifs,...) mesurés simultanément. L'étude des relations nitrate-température et nitrate-phosphate à l'intérieur d'une masse d'eau présente de nombreux intérêts (Herbland *et al.*, 1983; Voituriez et Herbland, 1984). Un changement, d'une région à l'autre ou d'une année à l'autre, de la pente de ces régressions est interprété comme une modification des interactions entre les composantes

physiques, chimiques ou biologiques de l'écosystème. Cette approche, bien qu'insuffisante pour appréhender dans le détail les mécanismes mis en jeu, est utilisée pour explorer la reproductibilité d'une année à l'autre des mécanismes d'enrichissement de l'upwelling sénégalais.

Les relations nitrate/phosphate (NO_3/PO_4) et nitrate/température (NO_3/T) peuvent aider à caractériser, sous un angle physique, la nature et l'origine d'une masse d'eau, ainsi que les processus de mélange de masses d'eau d'origine différente (Gardner, 1977; Fraga *et al.*, 1985). Redfield (1934) montre que la pente de la droite de régression entre nitrate et phosphate est statistiquement proche du rapport entre la composition en azote et en phosphore du plancton. Les sels nutritifs sont prélevés par le plancton dans des proportions exigées par la croissance de ces organismes (Redfield *et al.*, 1963). Une modification de cette pente peut, dans une optique biologique, être un indicateur d'un changement de la dynamique des communautés planctoniques et des processus de régénération à l'intérieur des masses d'eau (Coste et Slawyk, 1974; Tréguer et Le Corre, 1979; Voituriez et Herbland, 1984; Oudot et Morin, 1987). L'étude de la relation nitrate-température a connu un regain d'intérêt avec le développement des mesures de température de surface par satellite et la perspective de pouvoir dresser des cartes de nitrate à partir de celles de température (Traganza, 1985).

ORIGINE DES DONNÉES

Une série de prélèvements hebdomadaires à la station côtière de Yoff de 1985 à 1989 (Oudot et Roy, présent volume) et des données de surface provenant de trois campagnes océanographiques réalisées en saison d'upwelling (1986, 1987 et 1988) par le CRODT/ISRA sont utilisées. Ces données permettent de comparer d'une année à l'autre les relations NO_3/T et NO_3/PO_4 obtenues, soit à partir de la série temporelle de Yoff, soit à partir des structures spatiales échantillonnées lors des campagnes océanographiques. Des hypothèses basées sur différents processus physiques, chimiques ou biologiques sont avancées pour tenter de rendre compte de la variabilité observée.

LA RELATION NITRATE-TEMPÉRATURE DANS L'UPWELLING SÉNÉGALAIS

Le diagramme NO_3/T à la station côtière de Yoff de février 1985 à mai 1989 montre que la décroissance de la teneur en nitrate en fonction de la température est linéaire pour les valeurs de température inférieures à 21°C ; au delà de cette valeur, il y a une rupture de pente de la droite de régression et une forte dispersion des points (fig. 1). Pour les températures inférieures à 21°C , les estimateurs des paramètres de la régression sont significatifs au seuil de 99% (fig. 1). Cette linéarité entre 15°C et 21°C traduit un équilibre entre le taux de réchauffement de l'eau de surface et celui de la consommation des sels nutritifs (Minas *et al.*, 1986). Cette relation NO_3/T est similaire à celle obtenue à partir d'un

profil vertical dans la zone tropicale. Elle illustre l'apport d'eaux froides profondes dans la zone côtière par l'upwelling. Pour les températures supérieures à 21°C , le pourcentage de la variance expliquée par la régression est faible (9%). Ce seuil marque la fin des apports d'eaux froides par l'upwelling et correspond à la valeur de la température à partir de laquelle les eaux de surface au large du Sénégal ont des teneurs en nitrate voisines de zéro (fig. 2). Cette valeur est intermédiaire entre celle rencontrée dans l'upwelling équatorial du golfe de Guinée (Oudot et Morin, 1987) et celle observée dans l'upwelling de Mauritanie au cœur de la saison froide (Voituriez et Herbland, 1984). Les concentrations élevées enregistrées en zone littorale dans les eaux chaudes ($T > 21^\circ\text{C}$) semblent être le reflet d'un échange par diffusion entre les sédiments et la colonne d'eau (Oudot et Roy, présent volume). Cette étude sera limitée aux températures inférieures à 21°C .

Les relations NO_3/T à Yoff et sur le plateau continental sont identiques (fig. 2). Les estimateurs des paramètres des deux régressions sont significatifs au seuil de 99% (fig. 1 et 2). Cette homogénéité des estimateurs suggère qu'il existe une certaine similitude entre les processus se développant dans l'espace sur l'ensemble du plateau et ceux se déroulant dans le temps en un point fixe à la côte.

Variabilité interannuelle de la relation NO_3/T à la côte

La variabilité interannuelle de la relation NO_3/T à la côte est analysée à l'aide des données hebdomadaires de Yoff entre 1985 et 1989. Seules les températures inférieures à 21°C ont été prises en compte; chaque diagramme de dispersion correspond à une saison d'upwelling, notée *i*, qui s'étend du mois de décembre de l'année *i-1* au mois de mai de l'année *i*. Les pentes des droites de régression changent d'une année à l'autre (fig. 3, tab. 1); un test statistique montre que l'hypothèse d'égalité de ces pentes peut être rejetée ($F_{4,88} = 4,75$, significatif à $p = 0,01$). La pente la plus faible (en valeur absolue) est observée en 1985; les plus fortes pentes sont rencontrées en 1987 et 1989. La saison d'upwelling 1985 est celle où l'activité de la résurgence est la plus intense de la série, celle de 1987 la plus faible (Oudot et Roy, présent volume). La pente de la droite de régression NO_3/T semble inversement proportionnelle à l'intensité de l'upwelling, estimée soit à partir des températures moyennes en saison froide, soit à l'aide de l'indice d'upwelling (fig. 4). Dans un upwelling intense, la décroissance des nitrates en fonction de la température de surface serait moins rapide que dans un upwelling faible ou modéré. La validité de cette relation établie avec cinq années d'observation reste cependant à confirmer; la forte dispersion des points (fig. 4) suggère que l'intensité de l'upwelling n'est pas le seul facteur à prendre en compte.

Les différences entre les pentes des droites de régression NO_3/T sont essentiellement dues à des concentrations de nitrate, pour les températures comprises entre 18°C et 21°C , relativement plus faible en 1987 et 1989

Fig. 1

Relation entre les concentrations en nitrate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$) et la température ($^{\circ}\text{C}$) (pour $T < 21^{\circ}\text{C}$ et $T > 21^{\circ}\text{C}$) à la station côtière de Yoff (1985-1989).

Température < 21°C				
Paramètre	Estimation	Erreur standard	T	
Ordonnée	77,07	3,91	19,67	0,00
Pente	-3,50	0,21	-16,34	0,00
Coefficient de corrélation = -0,86 R-carré = 73,58 %				
Nombre de points = 97				

Température > 21°C				
Paramètre	Estimation	Erreur standard	T	
Ordonnée	9,26	3,91	5,13	0,00
Pente	-0,22	0,06	3,27	0,00
Coefficient de corrélation = -0,86 R-carré = 8,69 %				
Nombre de points = 114				

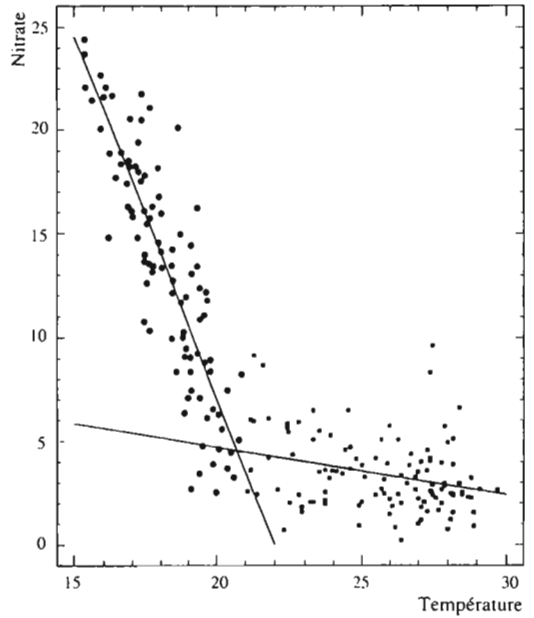


Fig. 2

Relation entre les concentrations en nitrate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$) et la température ($^{\circ}\text{C}$) (pour $T < 21^{\circ}\text{C}$) sur le plateau continental en surface (campagnes CIRSEN du CRODT, 1986-1987-1988).

Paramètre	Estimation	Erreur standard	T	
Ordonnée	74,30	3,08	24,13	0,00
Pente	-3,57	0,16	-21,39	0,00
Coefficient de corrélation = -0,87 R-carré = 76,31 %				
Nombre de points = 114				

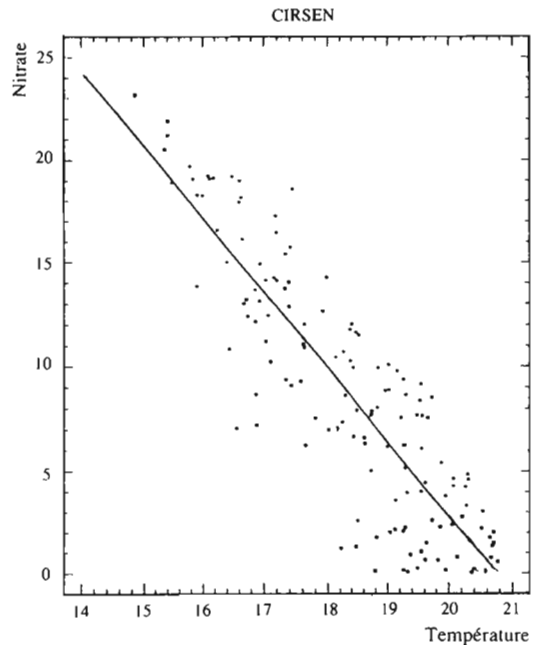


Fig. 3

Relation entre les concentrations en nitrate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$) et la température ($^{\circ}\text{C}$) (pour $T < 21^{\circ}\text{C}$) à la station côtière de Yoff pour les saisons d'upwelling entre 1985 et 1989.

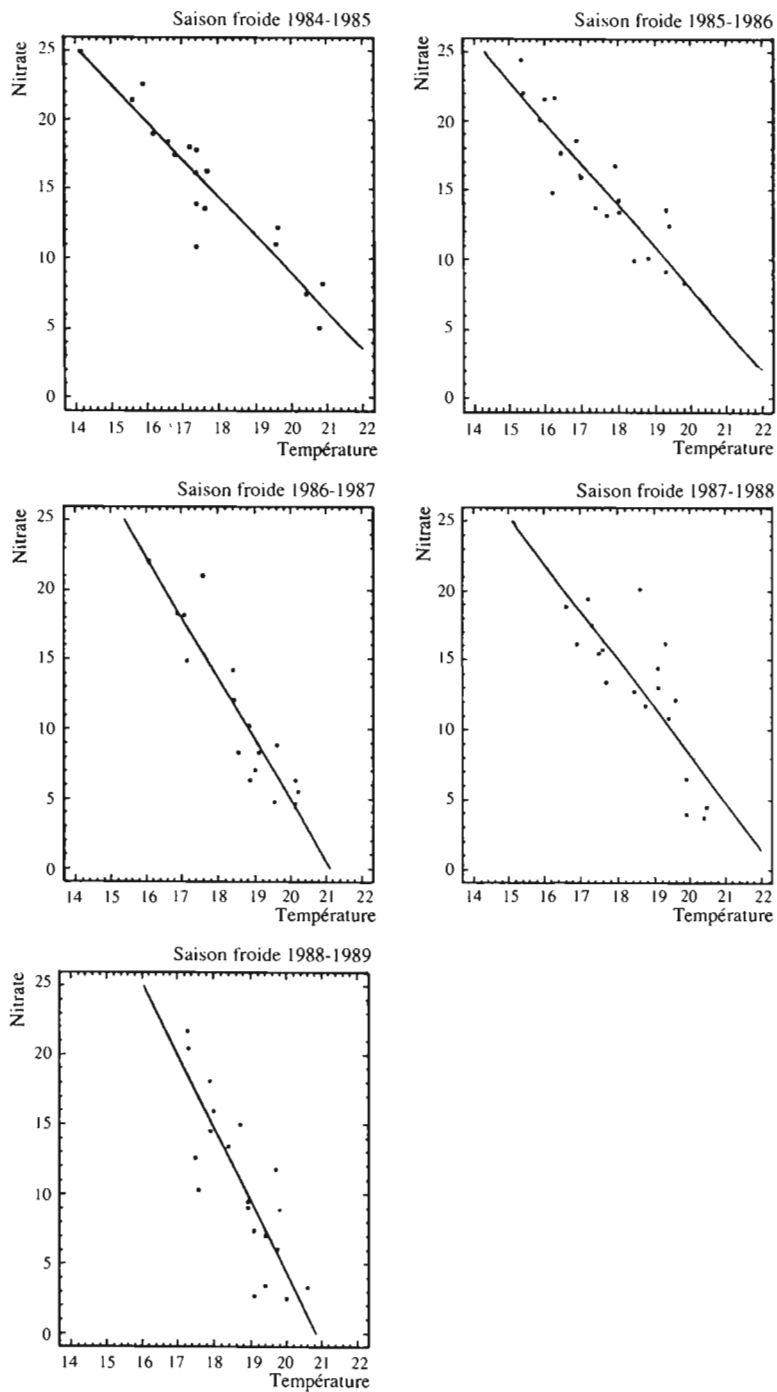
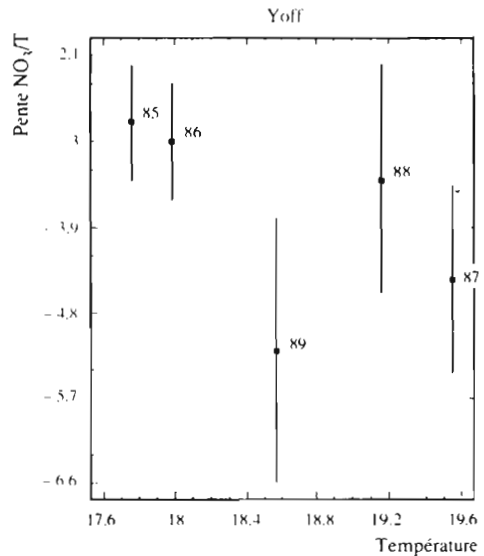


Fig. 4

Relation, de 1985 à 1989, entre la pente de la régression nitrate/température à la station côtière de Yoff et l'intensité de l'upwelling estimée à l'aide de la température moyenne en saison froide et de l'indice d'upwelling. L'intervalle de confiance ($p = 0.05$) est tracé pour chacun des estimateurs des pentes.



qu'en 1985, 1986 et 1988 (fig. 3). Ces températures sont observées au cours des périodes d'intensification et de relaxation de la résurgence. Plusieurs processus sont susceptibles de rendre compte de ce phénomène:

- en premier lieu, le phytoplancton pourrait être à l'origine de cette variabilité. En effet, la biomasse végétale dispose de conditions plus favorables pour se développer dans un upwelling modéré (stabilité accrue et brassage par le vent atténué) que dans un upwelling fort (Barber et Smith, 1981). Les faibles teneurs en nitrate observées en 1987 et 1989 à la côte pourraient être le résultat d'une assimilation plus importante des sels nutritifs par le phytoplancton en début et en fin de saison d'upwelling; si cette hypothèse semble vraisemblable en 1989 où les teneurs en chlorophylle restent constamment au dessus de la valeur moyenne (fig. 5, *in* Oudot et Roy, présent volume), elle ne semble pas s'appliquer à la saison d'upwelling 1987 pendant laquelle la chlorophylle reste à des concentrations proches de la moyenne;

- une seconde hypothèse serait un broutage excessif du phytoplancton par le zooplancton pendant les périodes d'intensification et de relaxation de l'upwelling en 1985, 1986 et 1988. Ce déséquilibre en faveur du zooplancton aurait limité la consommation des sels nutritifs et entraîné un accroissement relatif des teneurs en nitrate. De telles situations appelés "High Nutrients-Low Chlorophyll" (HNLC) ont été décrites par Walsh

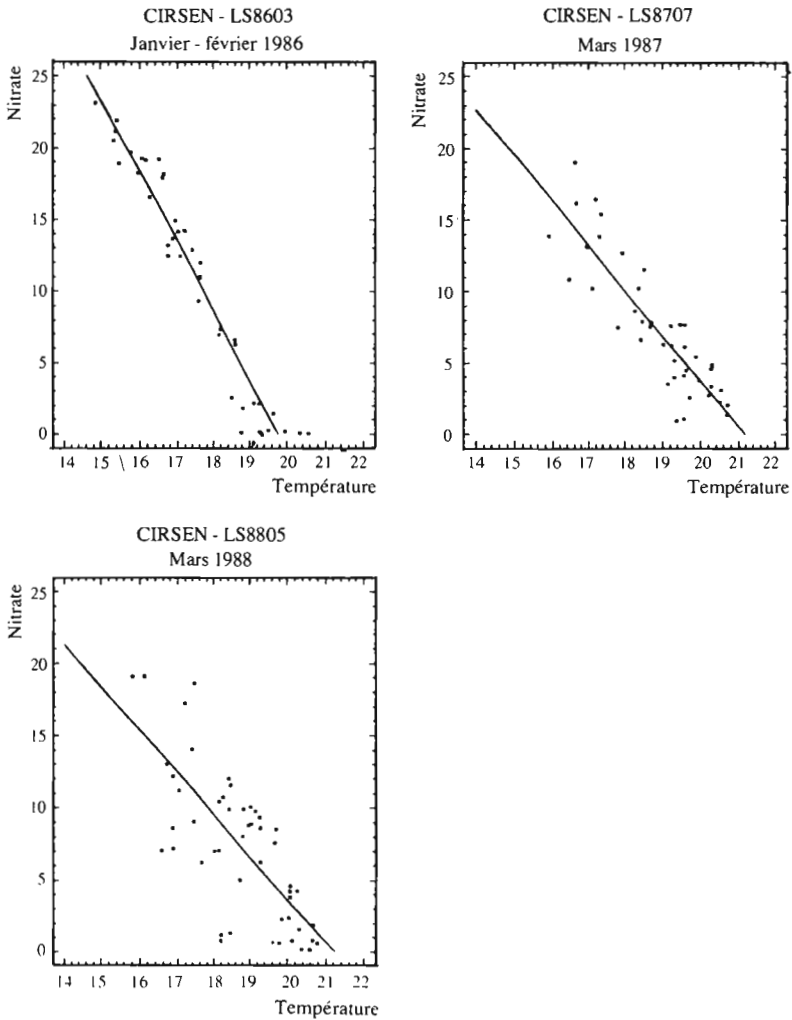
(1976) et Minas *et al.* (1986): elles sont fréquemment rencontrées dans des zones d'upwelling. Dans un écosystème dominé par le zooplancton, on constate une anomalie positive de la teneur en sels minéraux par rapport aux concentrations rencontrées dans un écosystème où la production est équilibrée. En retenant cette hypothèse, les saisons d'upwelling 1985, 1986 et à un degré moindre 1988, seraient des situations HNLC. L'absence de données concernant le zooplancton ne permet pas d'étayer cette hypothèse. D'autres mécanismes, comme la vitesse de dérive des eaux côtières, l'ensoleillement, sont également susceptibles d'entraîner une modification de la pente de la régression NO_3/T . Ne disposant pas d'informations suffisantes, il est difficile de sélectionner l'une ou l'autre de ces hypothèses. Une étude plus détaillée aurait sans doute montré des interactions complexes entre ces différents mécanismes qui peuvent rencontrer ponctuellement au cours de la période 1985-1989 des conditions propices pour s'exprimer.

Variabilité interannuelle de la relation NO_3/T sur le plateau continental

Dans le paragraphe précédent, l'analyse est basée sur des séries chronologiques relevées en un point du littoral. Des données quasi synoptiques couvrant le plateau continental et ses abords sont maintenant analysées. Ces données proviennent de trois campagnes océa-

Fig. 5

Relation entre les concentrations en nitrate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$) et la température ($^{\circ}\text{C}$) (pour $T < 21^{\circ}\text{C}$) en surface sur le plateau continental (campagnes CIRSEN du CRODT, 1986-1987-1988).



nographiques en période d'upwelling; les conditions rencontrées en 1986 sont celles d'un upwelling intense, les suivantes sont celles d'un upwelling faible (1987) ou modéré (1988).

Il existe une forte variabilité interannuelle de la pente de la droite de régression NO_3/T sur le plateau continental (fig. 5, tab. 2). Un test statistique montre que l'hypothèse d'égalité de ces pentes peut être rejetée ($F_{2,168} = 51,43$, significatif à $p = 0,01$). L'examen de la figure 5 appelle les remarques suivantes:

- la pente la plus forte est observée en 1986 au cours de l'upwelling le plus intense de la série 1986-1988. Les valeurs de nitrate observées pour des températures supérieures à 19°C semblent être plus faibles dans un upwelling fort (1986) que dans des upwellings faibles ou modérés (1987 et 1988);

- la dispersion des points autour de la droite de régression dans un upwelling fort (1986) est inférieure à celle rencontrée dans des upwellings faibles ou modérés (1987, 1988).

Une modification des échanges d'énergie entre l'atmosphère et la surface de l'océan dans des upwellings d'intensité différente peut être la cause de la variabilité des estimateurs des pentes. Le réchauffement des couches superficielles en direction du large dans un upwelling modéré est facilité par la présence d'une thermocline. Dans un upwelling fort, le brassage par le vent des couches superficielles accroît la profondeur de la couche de mélange et atténue le réchauffement superficiel. Dans des conditions de vents forts, la contribution de l'évaporation peut également devenir un facteur non négligeable dans le calcul du bilan thermique des échanges océan-atmosphère. Comparativement, la vitesse de réchauffement des eaux superficielles est vraisemblablement plus faible dans un upwelling intense que dans des conditions de vent modéré. Si l'on suppose que la vitesse d'assimilation des sels nutritifs varie peu par rapport à cet effet thermique, la température à partir de laquelle l'eau de mer de surface sera épuisée en nitrate dans un upwelling intense sera inférieure à celle rencontrée dans un upwelling d'intensité modérée. Cet écart entre les vitesses d'assimilation des sels nutritifs et de réchauffement de l'eau de surface semble rendre compte de la variabilité des pentes des régressions NO_3/T sur le plateau continental.

La dispersion des points autour de la droite de régression NO_3/T en 1987 et 1988 indique que la contribution de facteurs perturbateurs devient importante. Une modification de la consommation des sels minéraux par le phytoplancton pourrait rendre compte de cette forte dispersion. La prise en compte de la variable chlorophylle dans les régressions NO_3/T augmente sensiblement le pourcentage de variance expliquée en 1987 et 1988 (tab. 2). Le coefficient négatif associé au terme chlorophylle dans la régression signifie qu'un accroissement de la chlorophylle entraîne une baisse de la teneur en nitrate. La dispersion des points autour de la droite de régression semble être le reflet de la consommation des sels minéraux par le phytoplancton.

Ces résultats révèlent les limites de l'utilisation de la

relation NO_3/T pour prédire la distribution du nitrate de surface à partir de données thermiques (imagerie satellitaire) telle que l'a suggéré Traganza (1985). Des concentrations excessives de phytoplancton peuvent localement entraîner une diminution des teneurs en sels nutritifs et biaiser la prédiction du potentiel nutritif à partir de mesures de température. Le degré de précision attaché à une telle prédiction sera également affecté si les modifications de la pente de la régression NO_3/T suivant l'intensité de l'upwelling ne sont pas prises en compte.

VARIABILITÉ INTERANNUELLE DE LA RELATION NITRATE-PHOSPHATE DANS L'UPWELLING SÉNÉGALAIS.

Variabilité interannuelle de la relation NO_3/PO_4 à la station côtière de Yoff

Les paramètres de la régression NO_3/PO_4 ont été calculés pour les cinq saisons d'upwellings à la station côtière de Yoff (fig. 6, tab. 3). Seule la pente calculée pendant la saison d'upwelling 1985 s'écarte de façon notable de celles calculées les autres années, ces dernières restent voisines du rapport de Redfield $\text{N/P} = 16$. Herbland et Voituriez (1974) obtiennent une valeur semblable, proche de 11, en suivant une drogue dans des eaux nouvellement upwellées de l'upwelling mauritanien. En Côte-d'Ivoire, les observations sur le plateau continental en période d'upwelling donnent une valeur voisine de 12 (Herbland et Le Loeuff, sous presse). Ces faibles valeurs de pente de la relation NO_3/PO_4 seraient le reflet d'un écosystème dominé par un certain type de phytoplancton, les diatomées, dont le rapport de constitution N/P serait plus proche de 8 que de 16 (Herbland *et al.*, 1983; Herbland et Le Loeuff, sous presse). Ce type de plancton semble dominant dans des conditions de stabilité faible et de forte turbulence (Grahame, 1987). Ces conditions sont rencontrées lors de la saison d'upwelling de 1985 (fig. 3 in Oudot et Roy, présent volume).

Variabilité interannuelle de la relation NO_3/PO_4 sur le plateau continental

La relation NO_3/PO_4 obtenue à partir des campagnes océanographiques sur le plateau continental est linéaire, la pente est voisine de 15 (fig. 7, tab. 4). Seules quelques observations, pour la plupart réalisées en 1987, s'écartent du nuage de points (fig. 7). Ces observations ont comme caractéristique commune d'être situées dans la bordure côtière, sur des fonds ne dépassant pas une vingtaine de mètres. De plus, les observations de 1987 sont caractérisées par des fortes teneurs en nitrite ($>1,10\mu\text{mol.l}^{-1}$) et un taux de saturation en oxygène anormalement faible (fig. 7). Elles sont localisées au sud de la presqu'île du cap Vert où la largeur du plateau continental peut entraîner l'absence de mélange entre les eaux strictement côtières et celle du large. Ces taux de nitrite élevés et ces faibles concentrations relatives en oxygène semblent être des indices d'une activité de régénération des sels nutritifs particulièrement intense

Fig. 6

Relation entre les concentrations en nitrate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$) et en phosphate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$) en saison d'upwelling à la station côtière de Yoff de 1985 à 1989.

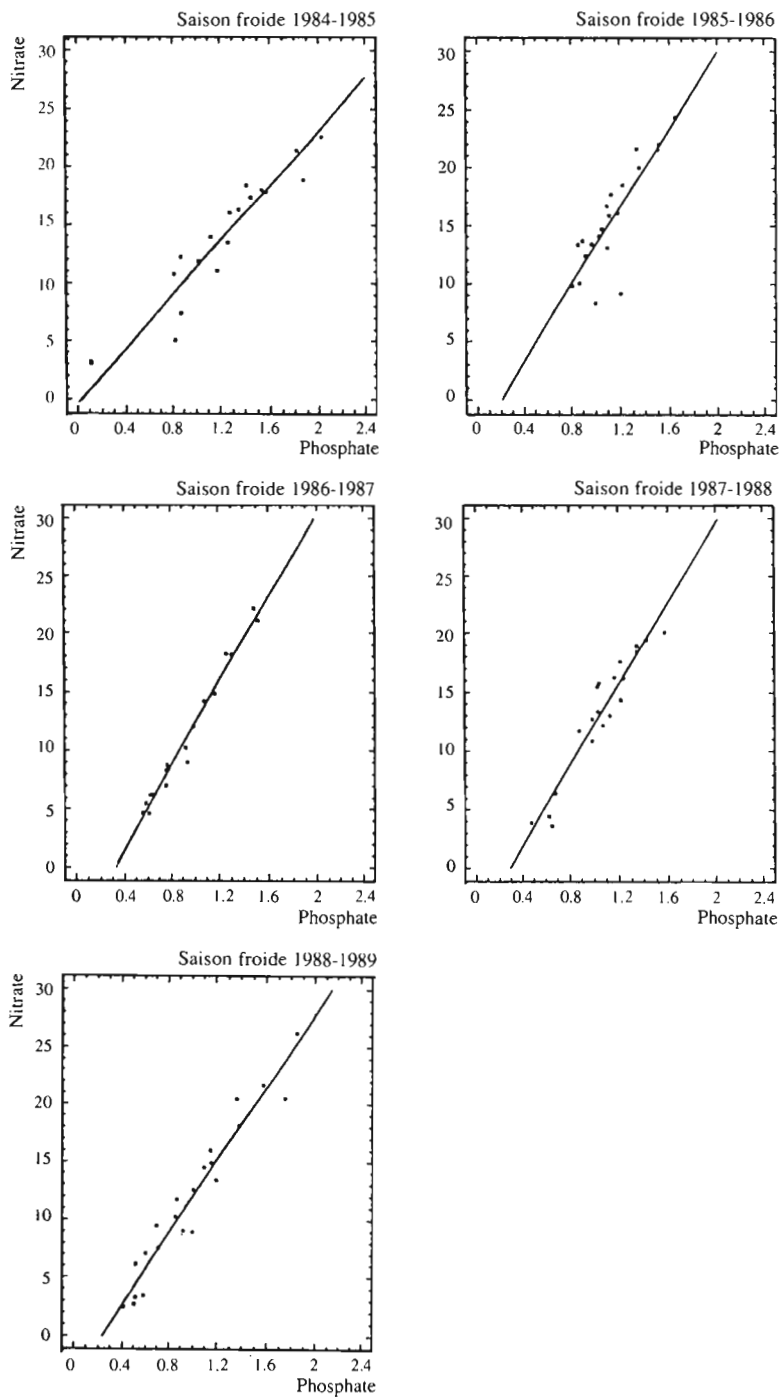


Fig. 7

Relation entre les concentrations en nitrate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$) et en phosphate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$) sur le plateau continental en saison d'upwelling (campagnes CIRSEN 1986-1987-1988). Les taux de saturation en oxygène (%) et les teneurs en nitrite ($\mu\text{mol.l}^{-1}$) sont indiqués pour les stations réalisées en 1987 sur les petits fonds au sud de la presqu'île du cap Vert.

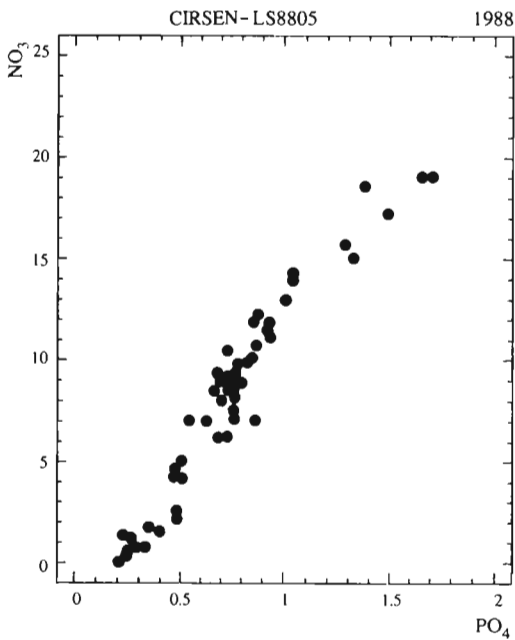
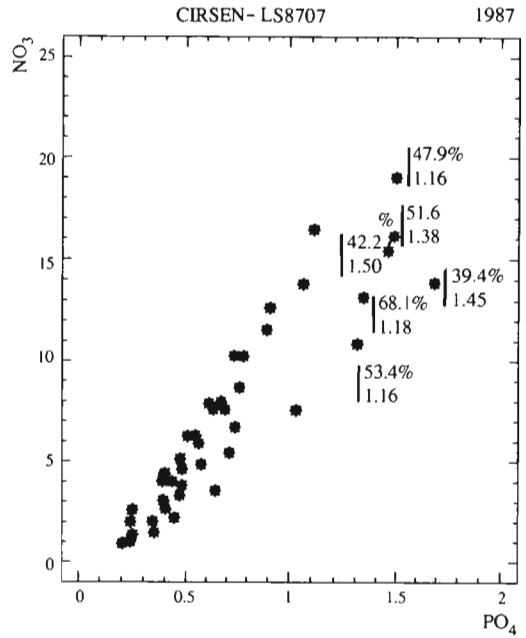
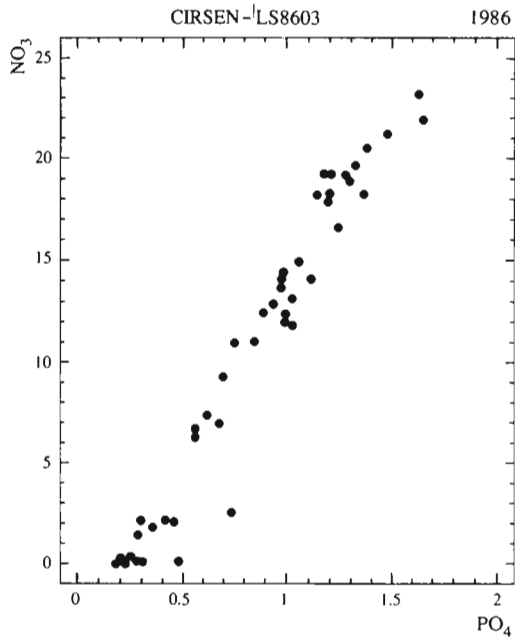


Tableau 1

Paramètres des régressions nitrate-température, à la station côtière de Yoff pour les saisons d'upwelling de 1985 à 1989.

SAISON	Régression NO ₃ /T
1984-1985	NO ₃ = 65.5(± 11.4) - 2.8(± 0.6) T ddl = 16 R ² = 84%
1985-1986	NO ₃ = 67.3(±12.0) - 3.0(±.6) T ddl = 20 R ² = 80%
1986-1987	NO ₃ = 92.2(± 17.6) - 4.4(± 1.0) T ddl = 17 R ² = 84%
1987-1988	NO ₃ = 76.9(± 22.4) - 3.4(± 1.2) T ddl = 18 R ² = 66%
1988-1989	NO ₃ = 108.9(± 25.0) - 5.2(± 1.4) T ddl = 21 R ² = 75%

Tableau 2

Paramètres des régressions nitrate-température et nitrate-température-chlorophylle en surface sur le plateau continental (Campagnes CIRSEN 1986-1987-1988).

CAMPAGNE	Régression NO ₃ /T ou Régression NO ₃ , T et CHL.
1986	NO ₃ = 96.3(± 6.4) - 4.9(± 0.4) T R ² =94% ddl = 44 ----- NO ₃ = 98.8(± 6.3) - 5.0(± 0.4) T - 0.4(± 0.2) CHL R ² =95% ddl = 42
1987	NO ₃ = 67.1(± 10.2) - 3.2(± 0.6) T R ² =78% ddl = 44 ----- NO ₃ = 68.6(± 8.6) - 3.2(± 0.4) T - 0.8(± 0.4) CHL R ² =83% ddl = 43
1988	NO ₃ = 63.0(± 13.2) - 3.0(± 0.7) T R ² =57% ddl = 54 ----- NO ₃ = 76.3(± 13.0) - 3.6(± 0.7) T - 0.8(± 0.3) CHL R ² =70% ddl = 46

Tableau 3

Paramètres des régressions nitrate-phosphate à la station côtière de Yoff, pour les saisons d'upwelling de 1985 à 1989.

SAISON	Régression NO ₃ /PO ₄
1984-1985	NO ₃ = -0.45(± 1.75) + 11.72(± 1.29) PO ₄ ddl = 16 R ² = 85%
1985-1986	NO ₃ = -3.45(± 2.75) + 16.79(± 2.39) PO ₄ ddl = 20 R ² = 72%
1986-1987	NO ₃ = -5.91(± 0.65) + 18.21(± 0.66) PO ₄ ddl = 17 R ² = 98%
1987-1988	NO ₃ = -5.07(± 1.43) + 17.36(± 1.32) PO ₄ ddl = 18 R ² = 91%
1988-1989	NO ₃ = -3.61(± 0.97) + 15.67(± 0.91) PO ₄ ddl = 21 R ² = 94%

Tableau 4

Paramètres de la régression nitrate/phosphate en surface sur le plateau continental d'après l'ensemble des données des campagnes CIRSEN 1986, 1987 et 1988.

Régression NO ₃ /PO ₄
NO ₃ = - 2.6(± 0.7) + 14.8(± 0.8) PO ₄ ddl = 143 R ² = 90%

qui serait favorisée par l'absence d'échange entre les eaux côtières et celles du large. D'après Tréguer et Le Corre (1979) et Minster et Boulahdid (1987), la régénération du phosphore serait plus rapide que celle de l'azote dans les zones côtières. Ces faibles valeurs de pente de la relation NO_3/PO_4 seraient le reflet d'un déséquilibre entre les processus de consommation et de régénération des sels nutritifs (Banze, 1974); un tel processus permet de rendre compte des anomalies positives de phosphate observées en 1987 par rapport à la situation moyenne.

DISCUSSION

L'apparente similitude entre la relation temporelle NO_3/T à Yoff et celle obtenue à partir d'observations spatiales effectuées lors des campagnes océanographiques nous avait amené, dans un premier temps, à envisager une identité entre les processus se développant dans le temps à la côte et ceux observés dans l'espace sur le plateau continental. L'étude de la variabilité interannuelle suggère que les fluctuations des pentes de la relation NO_3/T en fonction de l'intensité de l'upwelling sont opposées suivant le type d'échantillonnage: des données côtières couvrant l'ensemble d'une saison d'upwelling donnent une relation négative entre pente et intensité de la résurgence; des données synoptiques s'étendant de la côte vers le large suggèrent une corrélation positive entre intensité de l'upwelling et pente de la relation NO_3/T . Il semble exister des différences significatives entre la représentation des processus se développant en un point au cours d'une saison d'upwelling et celle de ceux se développant dans l'espace, à un instant donné, sur le plateau continental. Un upwelling a une dimension temporelle et une dimension spatiale que des mesures ponctuelles, dans l'espace ou dans le temps, ne permettent pas d'appréhender de façon exhaustive. La télédétection satellitaire couplée avec des mesures traditionnelles offre des perspectives intéressantes pour explorer cette variabilité. En effet, malgré les limites actuelles concernant la nature et la précision des informations distribuées, c'est un outil adapté à l'exploration de la dimension spatiale et temporelle d'une structure d'upwelling.

Les fluctuations interannuelles des relations NO_3/PO_4 sont une image de la non-reproductibilité des composantes biologiques et de leur dynamique. Certaines années, les mécanismes de production seraient dominés par l'activité du phytoplancton, d'autres années par celle du zooplancton; une forte activité de régénération des sels nutritifs peut également se développer ponctuellement. Ces modifications, difficilement décelables à l'aide de paramètres physiques, ont pu être identifiées de manière empirique à l'aide de paramètres chimiques; cependant, les causes de ces changements et leurs conséquences sur les maillons supérieurs restent inconnues.

Ces résultats illustrent la complexité des situations rencontrées dans un upwelling et la difficulté qu'il y a à modéliser la dynamique des premiers maillons de la

chaîne trophique. Ces difficultés semblent s'atténuer lorsqu'on étudie les maillons supérieurs de l'écosystème; les modèles développés par Belvèze (1984), Fréon (1984) et Cury et Roy (1987) sur la dynamique des pélagiques côtiers dans les zones d'upwelling en sont une illustration. Une durée de vie courte (quelques heures à quelques jours) et de faibles possibilités de déplacement dans le milieu (quelques mètres à quelques milles) rendent les premiers maillons de la chaîne trophique extrêmement sensibles à des conditions locales et souvent éphémères. Les maillons supérieurs de la chaîne trophique ont une durée de vie beaucoup plus importante, leur capacité à se déplacer dans le milieu leur offre la possibilité de lisser les effets locaux et momentanés apparaissant dans le milieu.

REMERCIEMENTS

Ce travail a pu être réalisé grâce à l'appui du CRODT/ISRA et de l'ORSTOM. Nous tenons à remercier J. Ferraris, I. Gning, P. Cury, P. Cecchi et C. Chaboud pour leurs commentaires qui nous ont été très utiles. Pour leur aide précieuse, tant au niveau des prélèvements que des mesures, nous tenons également à remercier E. Fukai, R. Gérard, P. Lamour, Y. Montel, P. Morin et J. Pages.

DISCUSSION

HERBLAND: J'attirerai l'attention sur le fait que la variance observée dans les relations nitrate-température est le reflet de phénomènes biologiques interprétables et non liée à un problème d'échantillonnage.

FREON: La cinétique du milieu et notamment la vitesse de dérive des eaux superficielles n'est-elle pas le facteur permettant d'expliquer les différences de pente des relations entre la température et les nitrates ?

ROY: La cinétique du milieu joue dans ce cas un rôle important. Dans un upwelling fort, la dérive des eaux de surface est rapide; sur le plateau continental, le réchauffement des couches superficielles sera alors moins important que dans un upwelling faible. Cette dynamique permet de rendre compte de pentes différentes mais n'explique pas la dispersion des points autour des droites de régression.

FREON: La température est-elle le meilleur indicateur de l'intensité d'un l'upwelling ? La télédétection n'apporte-t-elle pas de bonnes indications en intégrant l'extension spatiale des phénomènes ?

ROY: La notion d'upwelling fort ou faible dépend des phénomènes que l'on veut mesurer: intensité des mouvements verticaux, productions primaire et secondaire, etc... Or ceux-ci ne sont pas forcément reliés entre eux de façon simple et linéaire. On doit donc choisir des indices en fonction du phénomène que l'on veut quantifier. Pour estimer les apports en sels minéraux, la température est un bon indicateur mais cette même variable ne semble pas décrire de façon satisfaisante l'évolution trophique du milieu. La télédétection apporte des informations importantes sur les structures spatiales qu'il est nécessaire de prendre en compte pour quantifier l'intensité des upwellings.

HERBLAND: Ne pourrait-on pas faire des mesures d'eaux interstitielles pour mieux quantifier les apports par les sédiments ?

OUDOT: Bien sûr, cela serait réalisable et permettrait de valider nos hypothèses.

BIBLIOGRAPHIE

- 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.
- Barber, R.T. and R.L. Smith. 1981. Coastal upwelling ecosystems. *In: Analysis of marine ecosystems*, A. Longhurst, (ed.), Academic Press, p31-68.
- Belvêze, H. 1984. Biologie et dynamique des populations de sardine (*Sardina pilchardus*) peuplant les côtes Atlantiques marocaines et propositions pour un aménagement des pêcheries. Thèse de Doctorat d'Etat. Université de Bretagne Occidentale, 532p.
- Coste B. et G. Slawyk. 1974. Structures de répartitions superficielles des sels nutritifs dans une zone d'upwelling (Cap Corveiro, Sahara espagnol). *Thetis*, 6 (1-2): 123-132.
- Cury, P. et C. Roy. 1987. Upwelling et pêche des espèces pélagiques côtières de Côte-d'Ivoire: une approche globale. *Oceanol. Acta.*, 10(3): 347-357.
- Fraga, F., E.D. Barton and O. Llinas. 1985. The concentration of nutrients salts in «pure» North and South Atlantic Central Waters. *In: Simposio Internacional sobre las areas de afloramiento mas importantes del Oeste Africano*, C. Bas, R. Margalef et P. Rubies, eds. Instituto de investigaciones pesqueras, Barcelona, Vol. 1, p. 25-36.
- 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.
- Gardner, D. 1977. Nutrients as tracers of water mass structure in the coastal upwelling off Northwest Africa. *In M. Angel (ed.), A Voyage of discovery*. Pergamon Press. Oxford and New York, 712p.
- Grahame J. 1987. Plankton and fisheries. Edward Arnold, Londres, 140p.
- Herbland, A. et B. Voituriez. 1974. La production primaire dans l'upwelling mauritanien en mars 1973. *Cah. O.R.S.T.O.M. sér. Océanogr.* 12 (3), 187-201.
- Herbland, A., R. Le Borgne, A. Le Bouteiller et B. Voituriez. 1983. Structure hydrologique et production primaire dans l'Atlantique tropical oriental. *Océanogr. Trop.* 18 (2): 249- 293.
- Herbland A. et P. Le Loeuff, sous presse. Les sels nutritifs au large de la Côte-d'Ivoire. *In: Environnement et ressources aquatiques de Côte d'Ivoire*. 1. Le milieu marin. Leloeuff, Marchal, Amon Kotias (eds.), ORSTOM.
- Minas H.J., M. Minas et T.T. Packard. 1986. Productivity in upwelling areas deduced from hydrographic and chemical fields. *Limnol. Oceanogr.*, 31(6): 1182-1206.
- Minster J.F. et M. Boulaïdid. 1981. Redfield ratios along isopycnal surfaces - a complementary study. *Deep-Sea Res.*, 34(12): 1981-2003.
- Oudot C. et P. Morin, 1987. The distribution of nutrients in the equatorial Atlantic: relation to physical processes and phytoplankton biomass. *Oceanol. Acta*, Vol. sp., 6: 121-130.
- Oudot C. et C. Roy, Présent Volume. Les sels nutritifs au voisinage de Dakar: cycle annuel moyen et variabilité interannuelle.
- Redfield A. C. 1934. On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton. *In: James Johnstone memorial volume*, University Press of Liverpool, pp. 176-192.
- Redfield A.C., B.H. Ketchum and F.A. Richards. 1963. The influence of organisms on the composition of sea-water. *In: The sea, ideas and observations on progress in the study of the seas*. Vol. 2 M.N. Hill (ed.) Interscience, pp. 26-77.
- Traganza E.D. 1985. Application of satellites to chemical oceanography. *In Mapping strategies in chemical oceanography*. A. ZIRINO Ed. Amer. Chem. Soc. Washington, DC: 373-392.
- Tréguer P. et P. Le Corre. 1979. The ratio of nitrate, phosphate and silicate during uptake and régénération phases of the Moroccan upwelling regime. *Deep-Sea Res.*, 26: 163-184.
- Voituriez B. et A. Herbland. 1984. Signification de la relation nitrate-température dans l'upwelling équatorial du Golfe de Guinée. *Oceanol. Acta*, 7 (2): 169-174.
- Walsh J.J. 1976. Herbivory as a factor in patterns of nutrient utilization in the sea. *Limnol. Oceanogr.*, 21: 1-13.