

Sels nutritifs  
Hydrologie  
Conditions météorologiques  
Remontée d'eau  
Mauritanie  
  
Nutrients  
Hydrography  
Meteorology  
Upwelling  
Mauritania

# Analyse des facteurs régissant la distribution des sels nutritifs dans la zone de remontée d'eau des côtes mauritaniennes

B. Coste, H. J. Minas  
Laboratoire d'Océanographie, Faculté des Sciences de Luminy, Case 901,  
13288 Marseille Cedex 9, France.

Reçu le 5/11/81, révisé le 2/3/82, accepté le 18/3/82.

## RÉSUMÉ

La campagne Cineca-Charcot V s'est déroulée du 1<sup>er</sup> mars au 20 avril 1974 afin d'étudier, dans le cadre d'une coopération internationale (programme Cineca), les remontées d'eau dans une zone limitée au large des côtes de Mauritanie. La distribution des sels nutritifs est liée à trois facteurs : conditions météorologiques, contribution des eaux centrales nord et sud atlantiques aux eaux de remontée, activité biologique. Parmi ces facteurs les conditions météorologiques jouent un rôle prépondérant : la variation de l'intensité et de la direction des vents permet de définir une succession de périodes de remontée d'eau intense ou modérée (variant de 4 à 9 jours), séparées par des périodes sans remontée d'eau (de 2 à 5 jours) auxquelles correspondent des situations hydrologiques et des distributions de sels nutritifs caractéristiques.

La distribution de l'azote ammoniacal est particulière; elle est expliquée également à partir des différentes situations de remontée d'eau, mais l'activité biologique joue un rôle plus important, surtout par l'intermédiaire du recyclage rapide de la matière organique végétale lié à chaque période de production.

*Oceanol. Acta*, 1982, 5, 3, 315-324

## ABSTRACT

Analysis of the factors governing nutrient distribution in the upwelling area off the Mauritanian coast.

From March to April 1974, in connection with the Joint I Experiment, the Cineca-Charcot V cruise was carried out to study the mesoscale features of the upwelling area off Mauritania (Northwest Africa). Nutrient distributions may be explained by three factors: variability of meteorological conditions; contribution of North or South Atlantic Central Water (NACW or SACW); and biological activity. Among these factors, meteorological conditions are primordial. During the cruise, it was possible to define a succession of minor and major upwelling events (4 to 9 days) separated by relaxation periods (2 to 5 days) with particular hydrographic conditions and nutrient distribution patterns.

Ammonia distributions, which have specific features, may also be correlated with the different upwelling situations; but biological activity, and especially that related to the turnover of vegetal organic matter produced during enhanced photosynthetic activity, is also important.

*Oceanol. Acta*, 1982, 5, 3, 315-324

Jusqu'à ces dernières années, les remontées d'eau des côtes nord-ouest africaines n'avaient fait l'objet que d'un nombre limité d'études par rapport à d'autres régions intéressées par les mêmes phénomènes. D'autre part, les travaux concernant l'hydrologie (Furnestin, 1959) ou incluant des mesures de sels nutritifs (Jones, Folkard, 1970; Weichart, 1970) étaient entrepris souvent à une échelle trop importante pour prendre en compte la grande variabilité dans l'espace et dans le temps telle qu'elle apparaît actuellement à moyenne échelle.

Le programme Cineca (Cooperative Investigation of the Northern part of the Eastern Central Atlantic) a eu pour effet, à partir de 1969, de multiplier les campagnes océanographiques dans la zone comprise entre le Maroc et le Sénégal. Ces nombreux travaux ont eu pour premier résultat d'apporter des informations dans les domaines physique, chimique et biologique sur les centres les plus actifs de remontée d'eau (Margalef, 1971; Thiriot, 1973; Cruzado, 1974; Hughes, Barton, 1974 *a* et *b*; Groupe Médiproduct, 1974; Voituriez *et al.*, 1974; Le Corre, Tréguer, 1976, parmi d'autres) et sur les variations saisonnières (Schemainda *et al.*, 1975; Wooster *et al.*, 1976) ou locales (Jones, 1972) de leur intensité. En se basant en particulier sur les mesures effectuées au printemps 1971 (Groupe Médiproduct, 1974), la zone comprise entre les caps Blanc (20°50'N) et Corveiro (21°50'N) a été retenue pour entreprendre une étude détaillée à moyenne échelle durant les mois de février à mai 1974. Cette étude a vu la conjonction du programme américain Joint I (Barber, 1977) et d'un programme français matérialisé par la mission Cineca V des N/O « Jean-Charcot » et « Capricorne » (Groupe Médiproduct, 1976). Elle a été caractérisée par la prise en considération globale des processus à l'origine du phénomène de remontée d'eau et de ses conséquences sur l'environnement physique et chimique et sur l'activité biologique de cette région. L'opération Joint I a permis d'acquérir des informations détaillées sur les conditions météorologiques (Stuart *et al.*, 1975) et courantologiques (Pillsbury *et al.*, 1975) ainsi que des données physiques, chimiques et biologiques (Barber, Huntsman, 1975; Barton *et al.*, 1975; Friebertshausen *et al.*, 1975). Sur ces bases, des travaux récents ont apporté une connaissance détaillée sur l'hydrologie (Barton *et al.*, 1977), la courantologie (Mittelstaedt *et al.*, 1975), les sels nutritifs (Codispoti, Friederich, 1978; Friederich, Codispoti, 1979) et la production primaire (Huntsman, Barber, 1977; Jones, Halpern, 1981) de cette zone à cette époque de l'année. Un premier aperçu synthétique des relations entre les sels nutritifs et la production primaire a été présenté par Minas *et al.* (1982) et Codispoti *et al.* (1982). Ainsi, l'aire limitée concernée par l'opération Joint I est-elle à l'heure actuelle la région de remontée d'eau pour laquelle existent les informations les plus complètes pour une période donnée et à cette échelle-là, aussi bien sur les modalités de l'enrichissement en sels nutritifs que les diverses interactions entre les processus physiques et biologiques.

Cet article a pour but d'analyser les résultats concernant les sels nutritifs, obtenus pendant la campagne Cineca V

du « Jean-Charcot », en les replaçant dans le contexte général fourni par les articles cités précédemment et en s'appuyant sur les données physiques et biologiques obtenues simultanément au cours de cette mission. Il se propose plus particulièrement, d'une part de préciser l'influence des variations des conditions météorologiques sur les distributions des sels nutritifs et, d'autre part, d'évaluer la contribution de chacune des deux eaux centrales et le rôle de l'activité biologique.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

La campagne Cineca-Charcot V s'est déroulée du 1<sup>er</sup> mars au 20 avril 1974 dans une zone comprise entre les parallèles 20°50'N et 21°40'N (Cap Blanc et Cap Corveiro) d'une part et les méridiens 17°W et 17°50'W d'autre part (fig. 1). L'ensemble des données obtenues dans les différentes disciplines représentées ont été rassemblées dans un document unique (Groupe Médiproduct, 1976). Il comprend en particulier les résultats des observations physiques et chimiques des 98 stations hydrologiques réalisées par le NO « Jean-Charcot » et qui serviront de base à ce travail. Les positions des stations ont été choisies d'après les résultats de périodes de prospection (Groupe Médiproduct, 1976; Coste *et al.*, 1982) qui le plus souvent avaient lieu de nuit et au cours desquelles les caractéristiques hydrologiques et chimiques des eaux de surface étaient déterminées; d'une manière générale ces stations sont disposées le long de sections qui traversent les structures hydrologiques des eaux de remontée et qui ont été réalisées dans le minimum de temps afin d'obtenir une représentation quasi synoptique de la situation rencontrée. Dans ce travail, les données de 8 sections regroupant 48 stations (tableau 1) réalisées entre les 16 mars et 14 avril seront plus particulièrement prises en considération.

Le détail des méthodes utilisées est donné dans Groupe Médiproduct (1976). Les prélèvements ont été effectués aux immersions standard avec des bouteilles NIO jusqu'au fond avec une profondeur maximum de 1 000 m. Les températures ont été mesurées à l'aide de thermomètres à renversement Richter et Wiese; les salinités déterminées avec un salinomètre Beckmann modèle RS-7B; les concentrations en oxygène dissous ont été obtenues par la méthode de Winkler suivant le

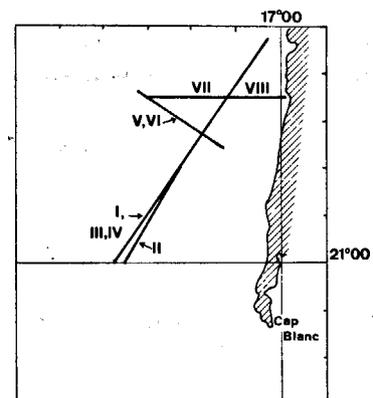


Figure 1  
Emplacement des sections réalisées au cours de la campagne Cineca-Charcot V.  
Section locations of the Cineca-Charcot V cruise.



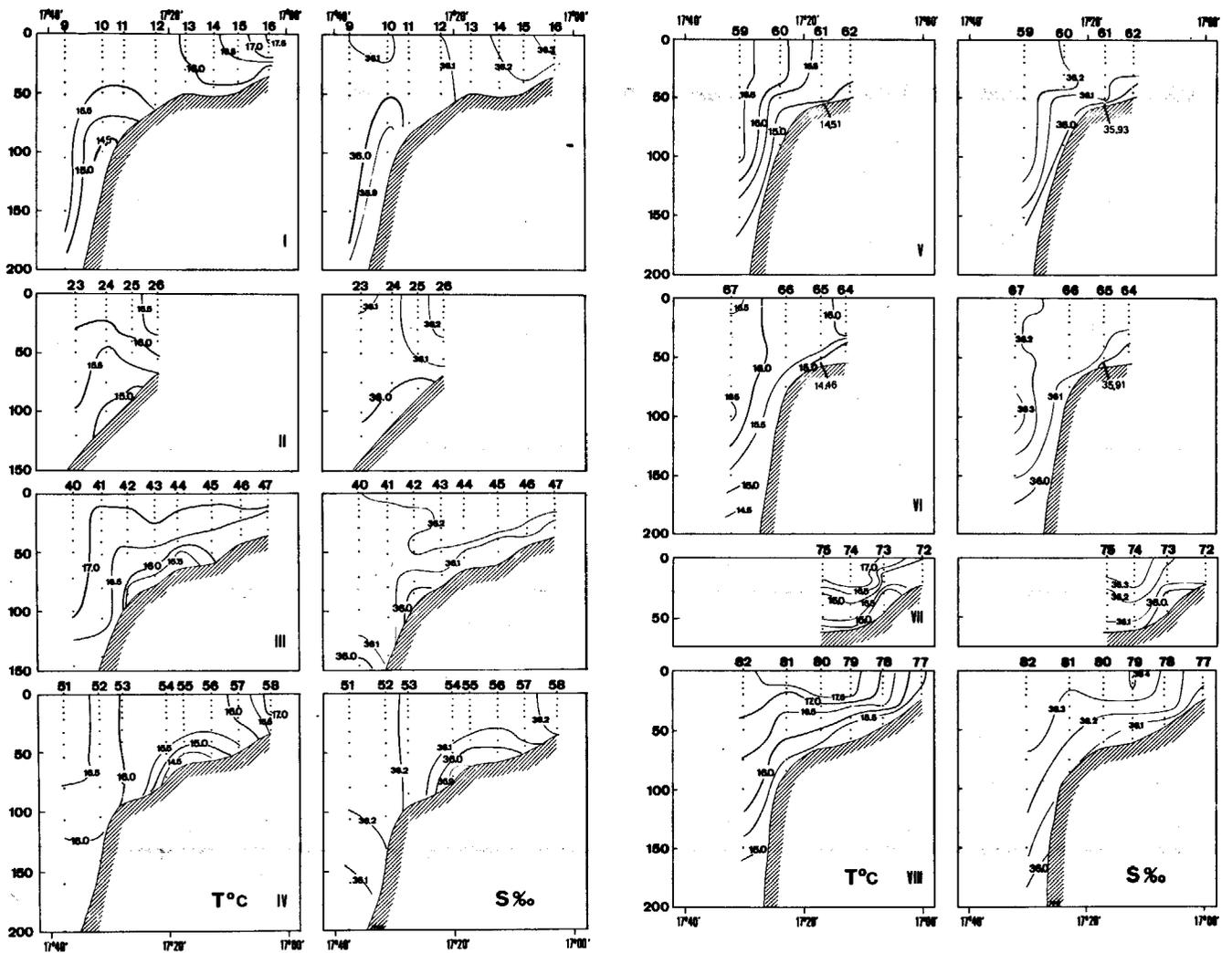


Figure 3  
Distribution des températures et salinités le long des différentes sections.  
Temperature and salinity distributions along the different sections.

de fluctuations aussi nettes car ces eaux sont extérieures au phénomène de remontée d'eau; elles participent au contre-courant orienté vers le nord (Mittelstaedt *et al.*, 1975) et qui limite la zone de remontée.

Dès que les vents soufflent dans une direction favorable, les températures superficielles diminuent brusquement. Leur distribution présente des caractéristiques différentes suivant l'intensité et la durée des conditions météorologiques. Par vent modéré ( $< 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) il y a apparition près de la côte d'eau plus froide qui n'est que sporadiquement inférieure à  $16^\circ\text{C}$  (période mineure de remontée d'eau). Par vent fort ( $> 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), une situation plus complexe se développe. Des eaux inférieures à  $17^\circ\text{C}$  apparaissent près de la côte, mais rapidement la zone de minimum thermique se déplace vers le large et peut atteindre le niveau de la rupture de pente du plateau continental. Les minimums de température sont alors nettement inférieurs à  $16^\circ\text{C}$ . A ce moment-là, la zone côtière peut être occupée par une eau de température supérieure à  $17^\circ\text{C}$  comme c'est le cas aux environs du 15 mars (fig. 5); il s'agit certainement d'une eau de remontée isolée par la circulation nord-sud intense plus au large et qui a subi un réchauffement sur place. On peut qualifier ces périodes de période majeure de remontée d'eau.

Ce schéma est confirmé par l'examen des coupes hydrologiques de la figure 3, qui montre en outre la répercussion des conditions météorologiques sur les structures sous-jacentes.

Les sections I, IV, V et VI qui se sont déroulées avec des conditions de vent les plus favorables aux remontées d'eau (fig. 2) sont bien caractérisées par la présence au centre du plateau continental d'eaux froides et peu salées représentatives du phénomène de remontée d'eau à ce niveau. Lorsque la section traverse l'ensemble des structures entre la côte et les eaux oligotrophes (sections I et IV), la présence de ces eaux froides parfaitement mélangées sur une profondeur de 40 à 60 m apparaît très clairement, en même temps qu'une eau plus chaude et salée est isolée contre la côte.

Avec des conditions moins favorables (vents plus faibles) telles que celles rencontrées aux sections VII et VIII, la majeure partie du plateau continental jusqu'à une profondeur d'environ 40 m est occupée par une eau relativement chaude et salée ( $T^\circ\text{C} > 17,0$ ;  $S \text{‰} \cong 36,25-36,30$ ) représentative des eaux oligotrophes qui se trouvent plus au large par vents plus forts. Les eaux froides sont cantonnées contre la côte et la continuité des isolignes avec les eaux sous-jacentes du talus et du large est l'indice de l'origine de la remontée.

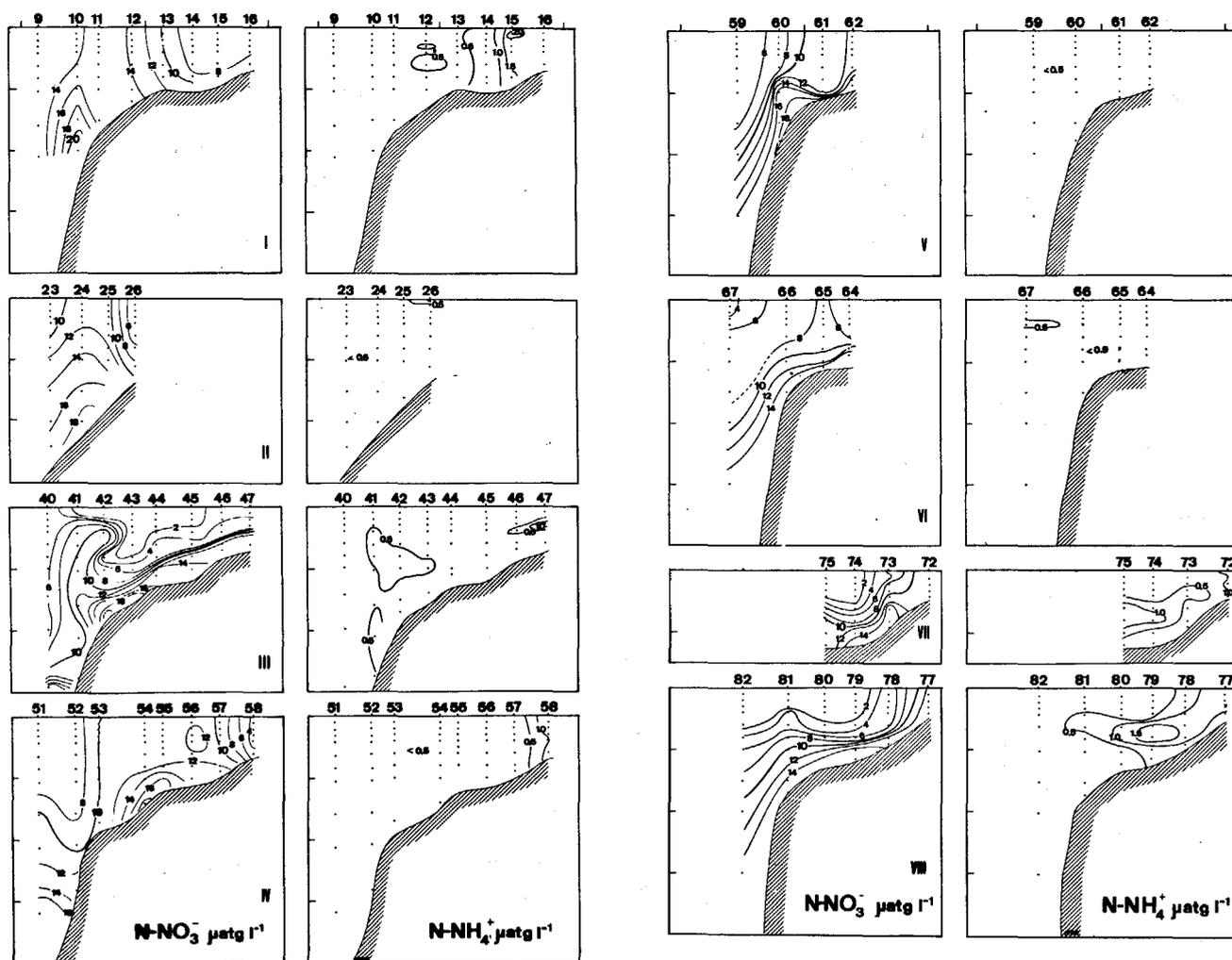
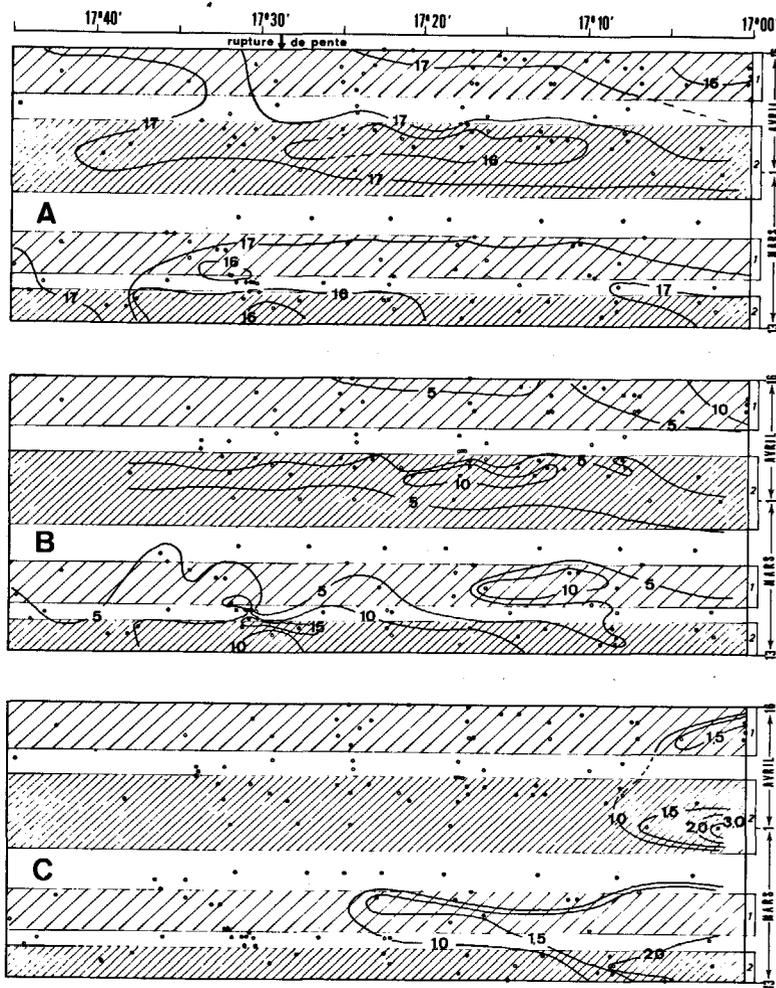


Figure 4  
Distribution de l'azote nitrique ( $N-NO_3^-$ ) et de l'azote ammoniacal ( $N-NH_4^+$ ) le long des différentes sections.  
Nitrate and ammonia distributions along the different sections.

Les sections II et III ont été exécutées avec des conditions météorologiques défavorables aux remontées d'eau (fig. 2). La section III est très représentative de cette situation : l'ensemble de la couche superficielle jusqu'à une profondeur d'au moins 30 m est occupée par des eaux de tendance oligotrophe de température supérieure à  $17^\circ C$  et de salinité voisine ou supérieure à  $36,2 \text{ ‰}$ . Les eaux d'origine sous-jacente ont disparu de cette couche. Par contre, la situation hydrologique de la section II n'est pas en accord avec la schématisation présentée par la figure 2. En effet, bien que cette section ne traverse qu'en partie les structures, les caractéristiques de température et de salinité des eaux de la couche superficielle ( $T^\circ C < 16,5$ ;  $S \text{ ‰} < 36,2$ ) montrent que ces eaux ne sont pas différentes des eaux de remontée vues précédemment. Une première explication de ce désaccord peut être recherchée dans le décalage dans le temps entre les deux phénomènes : Mittelstaedt *et al.* (1975) et Barton *et al.* (1977) ont estimé à environ 1 jour le temps de réponse des structures hydrologiques et du système courantologique aussi bien à l'établissement qu'à la cessation des conditions de vent défavorables. Un décalage du même ordre a été mis en évidence par Walsh *et al.* (1977) dans la zone de remontée d'eau de Basse-Californie. Or, la section II a lieu le 18 mars (tableau 1), et la première période de conditions très

favorables s'est arrêtée le 17 mars (fig. 2). Une autre explication peut reposer sur les variations locales. La détermination des différentes périodes repose en effet sur des données météorologiques récoltées à  $21^\circ 40' N$  et les stations de la section II sont échelonnées entre  $21^\circ$  et  $21^\circ 20' N$ . Or, les informations recueillies aussi bien sur le NO « Jean-Charcot » (Groupe Médiprod, 1976) qu'à une station terrestre installée à Nouadhibou (Stuart *et al.*, 1975) font état pour cette région plus au sud de la persistance le 18 mars de vents forts ( $\approx 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) soufflant du nord. En fait cette situation marque les limites d'un schéma très simple applicable à l'ensemble de la région. Si un tel schéma rend compte d'une manière satisfaisante des situations établies, il n'en est pas de même pour les périodes de transition durant lesquelles les structures hydrologiques ont une plus forte variabilité. Ces périodes sont caractérisées par une distribution des températures de surface en « tache » avec, de plus, l'apparition d'une forte variabilité entre les zones sud et nord (Barton *et al.*, 1977).

Ainsi l'apparent désaccord entre les structures hydrologiques de la section II et l'évolution de la situation météorologique telle qu'elle est schématisée par la figure 2 n'est que la conséquence des phases de transition séparant les situations plus typiques représentées par les autres sections.



**Figure 5**  
Variation des distributions superficielles de la température T°C (A), de l'azote nitrique N-NO<sub>3</sub> en µatg/l (B) et de l'azote ammoniacal N-NH<sub>4</sub> en µatg/l (C) du 13 mars au 16 avril 1974 entre 17°W et 17° 45'W pour la zone comprise entre le Cap Blanc et le Cap Corveiro. Les trames indiquent les périodes de vents favorables aux remontées d'eau (1 = vents modérés; 2 = vents forts). Les données proviennent des campagnes Cineca-Charcot V (cercles noirs) et Joint I Atlantis II (cercles blancs).

Variations of surface parameters: A = temperature (°C), B = nitrate and C = ammonia concentrations (µatg.l<sup>-1</sup>) from 13-16 April between 17°W and 17°45'W in the Joint I area. Shaded areas show period of upwelling (1 = weak winds; 2 = strong winds). Data are taken from Cineca-Charcot V cruise (black circles) and from R/V Atlantis II cruise 82 (white circles).

Cette influence des conditions météorologiques ne se manifeste pas uniquement sur la couche superficielle. Toutes les sections ont une caractéristique commune : sur le fond du plateau continental ou au niveau de la

rupture de pente se trouve une eau présentant un minimum thermique et halin qui, plus au large, correspond à des eaux d'immersion 150-200 m. Elles participent donc au mouvement de remontée d'eau; leurs caractéristiques hydrologiques et chimiques ont été regroupées dans le tableau 2. Un classement par minimum thermique décroissant donne la succession : section VIII (15,12°C), III (15,08°C), II (14,85°C), VII (14,78°C), V (14,51°C), VI (14,46°C), I (14,30°C) et IV (14,06°C). A l'exception de la section VIII, cette distribution regroupe successivement les sections correspondant à des conditions défavorables (II, III), moyennement favorables (VII) et très favorables (V, VI, I, IV). Ainsi plus les conditions sont favorables (plus le vent est fort et souffle du nord-nord-est), plus ce sont des eaux provenant d'immersions plus profondes qui atteignent le plateau continental. Le cas particulier de la section II vu plus haut est confirmé : la valeur du minimum thermique du plateau continental la situe à la limite des cas correspondant aux conditions défavorables et moyennement favorables.

*Distribution des sels nutritifs*

Les distributions des sels nutritifs peuvent également être expliquées à partir des variations des conditions météorologiques et des structures thermiques. Ainsi, les apparitions en surface (fig. 5B) de concentrations de nitrate supérieures à 5 µatg.l<sup>-1</sup> sont étroitement liées à la présence d'eaux de température inférieure à 16,5°C et les noyaux de concentration maximale se superposent parfaitement aux noyaux des eaux les plus froides. Il en est de même pour les eaux-sous-jacentes. La comparaison des isolignes des températures (fig. 3) et des concentrations en nitrate (fig. 4) est saisissante à ce propos. Pour l'ensemble des sections il existe en effet un parallélisme presque parfait. Aux eaux froides de remontée, qu'elles soient contre la côte ou au niveau de la rupture de pente, sont associées des concentrations élevées en sels nutritifs. De même, les eaux froides qui se trouvent sur le fond du plateau ont une concentration en sels nutritifs qui traduit leur immersion d'origine. Ces fortes valeurs ne peuvent être attribuées, comme pour certaines régions des côtes marocaines (Tréguer, Le Corre, 1979), à une minéralisation sur place car l'ensemble des caractéristiques physiques et chimiques (température, salinité, oxygène dissous, sels nutritifs) sont identiques à celles trouvées plus au large entre 150 et 200 m de profondeur.

**Tableau 2**  
Récapitulation pour les différentes sections des caractéristiques des eaux présentant un minimum thermique contre le talus ou sur le plateau continental.

*Data of colder waters on the bottom of the continental shelf for sections I-VIII.*

Section N°	Station N°	Prof. (m)	Température (°C)	Salinité (‰)	O <sub>2</sub> (ml.l <sup>-1</sup> )	N-NO <sub>3</sub> (µatg.l <sup>-1</sup> )	Si-SiO <sub>3</sub> (µatg.l <sup>-1</sup> )
I	10	100	14,30	35,82	2,65	21,8	11,5
II	24	100	14,85	35,94	3,33	19,0	6,4
III	42	85	15,08	35,94	3,15	20,4	7,2
IV	54	70	14,06	35,88	2,80	18,5	4,4
V	60	90	14,51	35,93	2,93	18,1	9,8
VI	65	55	14,46	35,91	3,32	17,4	7,6
VII	73	45	14,78	35,98	3,13	15,0	8,9
VIII	78	45	15,12	36,05	3,47	13,8	9,3

Pour les eaux de température supérieure à 17°C on rencontre des concentrations en nitrate comprises entre 0,1 et 7  $\mu\text{atg} \cdot \text{l}^{-1} \text{N-NO}_3^-$ . Ce large éventail est dû à la différence d'origine de ces eaux. Dans le cas des faibles concentrations (sections III, VII et VIII), il s'agit de l'eau oligotrophe du large qui, suivant les conditions météorologiques, envahit plus ou moins le plateau continental. Dans le cas des concentrations plus élevées (sections I et VI), il s'agit d'eaux qui, pendant les périodes majeures de remontée d'eau, sont maintenues contre la côte par la circulation générale; leurs caractéristiques peuvent être expliquées soit par un enrichissement d'eau oligotrophe antérieurement présente à partir d'une minéralisation sur le fond, soit par des modifications physiques (évaporation et réchauffement) d'une eau de remontée ayant seulement une circulation côtière. Leur niveau d'oxygénation proche de la saturation et leur richesse en nitrate font plutôt pencher pour la seconde interprétation.

La distribution de l'azote ammoniacal est tout à fait différente de celle de l'azote nitrique (fig. 4 et 5). Les liens avec les structures hydrologiques et avec les conditions météorologiques n'apparaissent pas aussi clairement. Toutefois, on peut montrer qu'à chaque type de situation de remontée d'eau correspond une distribution particulière de l'azote ammoniacal. Lorsqu'il n'y a pas de remontée d'eau, les eaux superficielles sont dépourvues sur toute la zone d'azote ammoniacal (fig. 5). Dans les eaux sous-jacentes, un horizon diffus peut exister (par exemple sur la section n° III, fig. 3) qui peut être interprété comme un reliquat de la situation précédente. La situation du 18 mars fait exception puisque la zone côtière présente des concentrations élevées; elle confirme le caractère particulier de cette période, mis en évidence plus haut par les structures hydrologiques et chimiques de la section n° II, et qui est expliqué par la durée trop courte des conditions météorologiques défavorables.

Pendant les périodes majeures de remontée d'eaux, la présence d'ammoniaque est limitée aux eaux isolées près de la côte avec des valeurs du même ordre de grandeur sur toute la colonne d'eau. Pendant les périodes mineures de remontée d'eaux, on retrouve pour la zone côtière la même distribution que précédemment, mais il apparaît en subsurface vers le large, une couche dans laquelle la concentration en azote ammoniacal peut dépasser 1,5  $\mu\text{atg} \cdot \text{l}^{-1}$ .

#### Contribution des eaux centrales nord et sud atlantique

Une autre source de variabilité dans la teneur en sels nutritifs des eaux de remontée peut être recherchée dans leur appartenance à l'une ou l'autre des deux masses d'eau de la région présentes entre 100 et 800 m de profondeur : l'eau centrale nord atlantique (ECNA) et l'eau centrale sud atlantique (ECSA) (Sverdrup *et al.*, 1942). En effet, Fraga (1973) a montré que les concentrations en sels nutritifs de l'ECSA étaient environ le triple de celles de l'ECNA. D'autre part, ce même auteur (Fraga, 1974) ainsi que Hughes et Barton (1974 *b*) et Tomczak (1978) ont montré que la zone d'influence de ces deux eaux avait pour limite la région

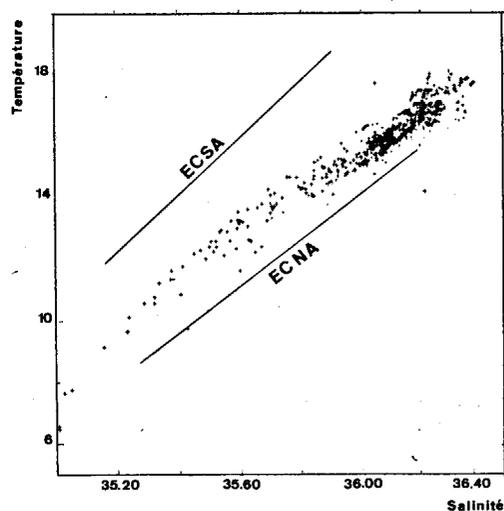


Figure 6

Diagrammes T-S de l'ensemble des données de la campagne Cineca-Charcot V et représentation des deux masses d'eau : eau centrale nord atlantique (ECNA) et eau centrale sud atlantique (ECSA) selon Sverdrup *et al.* (1942).

T-S diagram with all the data of the Cineca-Charcot V cruise: ECNA=North Atlantic Central Water; ECSA=South Atlantic Central Water.

avoisinant le Cap Blanc. Le diagramme T-S des données de la campagne Cineca-Charcot V (fig. 6) fait apparaître que tous les points représentatifs se trouvent entre les droites de l'ECNA et de l'ECSA. Les eaux prélevées correspondent donc à un mélange de ces deux eaux dans des proportions que l'on peut déterminer avec une bonne approximation à partir de la distance à chacune des deux droites. La part de l'ECNA est donc prépondérante pour l'ensemble des eaux étudiées. Pour mettre en évidence une éventuelle variabilité de la composition des eaux de remontée on a tracé, bien que ce procédé soit aléatoire pour des eaux superficielles, un diagramme T-S des prélèvements des 30 premiers mètres pour chacune des sections. Sauf pour la section n° III dont les points ont une répartition hétérogène, les caractéristiques T-S de ces eaux s'alignent pour chacune des sections parallèlement à la droite de l'ECNA; c'est-à-dire que la proportion des deux eaux est constante tout au long de la section et qu'il n'apparaît pas une variabilité due aux différences de latitude. A partir de la distance de ces droites à celles de l'ECNA et de l'ECSA on a calculé le pourcentage d'ECNA de chacune des sections. Pour les sections n° I, IV, V et VI il est compris entre 85 et 88 %; pour les sections n° VII et VIII il est égal à 82 et 83 % et pour la section n° II il est de 76 % (sur la section n° III il est, pour la majeure partie des points, inférieur à 70 %). Ainsi, plus les remontées d'eau sont intenses, plus la part de l'ECNA est élevée. En se basant sur les rapports des concentrations de sels nutritifs de ces deux eaux, cette variabilité de pourcentage peut être la cause d'une différence de concentration d'environ 10%; elle peut expliquer les plus fortes valeurs sporadiques en surface ( $\approx 15 \mu\text{atg} \cdot \text{l}^{-1} \text{N-NO}_3^-$ ) mesurées par exemple immédiatement après la première période maximale de remontée d'eau (stations 17 et 18 du 17 mars), mais joue un rôle secondaire sur les variations observées des concentrations en nitrate de la couche superficielle. Cette liaison entre les conditions météorologiques et la fraction des

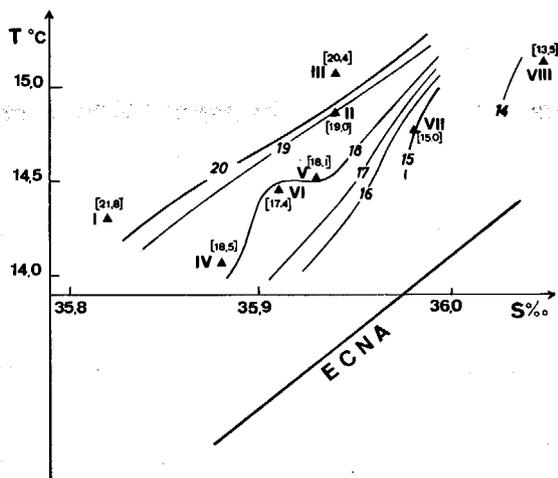


Figure 7  
Diagramme T-S des prélèvements correspondant au minimum thermique des eaux froides du fond du plateau continental des différentes sections (I à VIII). Isolignes des concentrations en azote sous forme de nitrate ( $\mu\text{g-at. l}^{-1}$ ).

T-S diagram with data of colder waters on the bottom of the continental shelf. I-VIII indicate the section numbering. Isolines are for nitrate concentrations ( $\mu\text{g-at. l}^{-1}$ ).

deux eaux centrales peut aussi être étudiée à partir des caractéristiques des eaux froides situées sur le fond du plateau continental. Afin de ne pas prendre en compte des eaux ayant subi un mélange avec la couche superficielle, on a seulement pris en considération, pour chaque radiale, le prélèvement ayant la température minimale. Le diagramme T-S (fig. 7) montre que, à l'exception du point représentatif de la section n° I, la fraction d'ECNA est plus élevée lorsque les conditions météorologiques sont favorables (sections n°s IV à VIII) que lorsqu'elles sont défavorables (sections n°s II et III). Il est à remarquer que les eaux du premier groupe ont une fraction équivalente d'ECNA et d'ECSA; mais pour les sections réalisées par les conditions les plus favorables (IV, V, VI), l'eau du minimum thermique est plus froide et moins salée que pour celles réalisées par des conditions moins favorables (VII et VIII). Ceci est à attribuer à une immersion d'origine plus profonde lorsque les conditions sont très favorables. D'autre part, la position sur le diagramme T-S permet d'expliquer l'apparente contradiction vue plus haut pour la section n° VIII à partir de la seule valeur de la température.

Sur ce même diagramme, les isolignes des concentrations en azote nitrique ont été tracées à partir des concentrations de chaque point. Elles confirment les conclusions tirées du diagramme T-S et sont conformes aux caractéristiques de la distribution des sels nutritifs dans la région : plus les eaux sont proches de l'ECSA plus elles sont riches en sels nutritifs, et pour les eaux les plus riches en ECNA (IV à VIII) leur concentration en azote nitrique croît en même temps que l'immersion d'origine de ces eaux.

La position sur le diagramme T-S du point correspondant à la section n° I ne trouve pas d'interprétation simple. Une explication pourrait être recherchée dans la circulation à plus grande échelle, indépendante des vents locaux, qui affecte également cette région (Mittelstaedt *et al.*, 1975; Schaffer, 1976) mais les données recueillies englobent une zone trop restreinte pour aboutir à une

conclusion. Il est également possible que cette position soit la conséquence d'une variabilité nord-sud mise en évidence par Codispoti et Friederich (1978) pour des eaux plus profondes; mais qui ne permet pas d'interpréter l'ensemble des autres points représentés. Cette variabilité des caractéristiques physiques et chimiques (part de chacune des eaux centrales et immersion d'origine) est en accord avec les résultats courantologiques (Mittelstaedt *et al.*, 1975) qui montrent que les vents de nord ont pour conséquence, en accroissant les frictions entre les eaux superficielles dérivant vers le sud et celles du sous-courant remontant vers le nord, de diminuer l'influence de l'ECSA au profit de l'ECNA.

## Rôle de l'activité biologique

### Azote nitrique

Le système courantologie-concentration en sels nutritifs-cinétiques d'assimilation rend difficile la mise en évidence du rôle de l'activité biologique sur la distribution des sels nutritifs. Lorsque les conditions sont favorables aux remontées d'eau, les courants sur le plateau continental sont dirigés vers le sud avec des vitesses dépassant  $20 \text{ cm. s}^{-1}$  (Mittelstaedt *et al.*, 1975). Étant donnée la dimension de la zone étudiée, ceci signifie que le temps maximal de résidence d'une eau remontant dans la couche superficielle est inférieur à 100 heures. D'autre part, les vitesses d'assimilation de l'azote sous forme de nitrate sont, pour ces eaux, de l'ordre de  $0,2$  à  $0,3 \mu\text{g. l}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$  (Slawyk, 1980). La concentration d'azote nitrique consommé à l'intérieur de cette zone est donc de l'ordre de  $1 \mu\text{g. l}^{-1}$ . Compte tenu de la concentration des eaux de remontée ( $\approx 12 \mu\text{g. l}^{-1}$ ), le rôle joué par l'activité biologique sur les variations des concentrations en nitrate est donc mineur.

Toutefois, dans certains cas, une activité biologique peut être mise en évidence. Les sections n°s V et VI sont la répétition des mêmes stations à un jour d'intervalle (tableau 1 et fig. 1). Le tableau 3 rassemble les données des eaux superficielles de deux stations de chacune de ces radiales. Elles sont très proches par leurs caractéristiques hydrologiques alors que, entre les deux jours, l'azote nitrique a diminué de  $4 \mu\text{g. l}^{-1}$ . Cette diminution peut être attribuée à l'activité biologique car d'une part, entre le 5 et le 6 mars le vent a fortement diminué, ce qui est un facteur favorable au développement phytoplanctonique (Huntsman, Barber, 1977; Minas *et al.*, 1978; Slawyk, 1980; Jones, Halpern, 1981) et d'autre part la teneur en chlorophylle *a* et en oxygène dissous ont respectivement augmenté de  $7 \text{ mg. m}^{-3}$  et  $0,6 \text{ ml. l}^{-1}$ .

La zone étudiée est donc caractérisée par une succession de périodes au cours desquelles les facteurs physiques sont prépondérants dans la distribution de l'azote nitrique et de courtes transitions au cours desquelles une activité biologique intense influe sur ces distributions. Une telle situation est proche de celle décrite par Small et Menzies (1981) pour une zone de remontée d'eaux des côtes de l'Oregon.

Tableau 3

Caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des eaux superficielles de deux stations des sections n° V et VI montrant l'évolution de la concentration des sels nutritifs et de la teneur en chlorophylle *a* en 24 heures.

Physical, chemical and biological surface water data of two stations (sections V and VI), showing nutrient assimilation and increase of chlorophyll *a* and dissolved oxygen.

Section N°	Station N°	Date	Heure	Température (°C)	Salinité (‰)	O <sub>2</sub> (ml.l <sup>-1</sup> )	N-NO <sub>3</sub> N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		Chl. <i>a</i> (mg. m <sup>-3</sup> )
							(μatg.l <sup>-1</sup> )		
V	61	5/4	4 h 20	15,6	36,10	4,54	11,4	0,04	3,3
	62	5/4	5 h 25	15,7	36,12	4,45	12,1	0,10	2,0
VI	65	6/4	8 h 30	15,8	36,12	5,05	8,2	0,04	7,5
	66	6/4	9 h 45	15,9	36,14	5,15	7,2	0,04	11,7

### Azote ammoniacal

A partir des analyses précédentes, il est possible d'interpréter les distributions de l'azote ammoniacal (fig. 4 et 5 C) de la façon suivante : à chaque transition intervenant à la fin d'une période de remontée d'eau, il se produit un intense développement phytoplanctonique. Il est suivi d'une sédimentation et d'une régénération suffisamment rapide pour entraîner l'apparition d'un maximum subsuperficiel d'azote ammoniacal. Un tel horizon lié à une poussée phytoplanctonique a été observé par Le Borgne (1978) dans une zone plus au sud (Cap Timiris). L'hypothèse de l'origine végétale de ce maximum est confortée par les mesures répétées à 24 heures d'intervalle sur les mêmes positions (tableau 3) au moment d'une période de transition : alors que le premier jour, les concentrations en azote ammoniacal sont homogènes (0,04 à 0,14 μatg.l<sup>-1</sup>), le second, apparaît, simultanément à l'accroissement de la biomasse phytoplanctonique, un maximum subsuperficiel d'azote ammoniacal (0,20 à 0,44 μatg.l<sup>-1</sup>).

Plusieurs interprétations ont été données pour expliquer les concentrations supérieures à 0,5 μatg.l<sup>-1</sup> sur toute la colonne d'eau dans la zone côtière : valeur élevée du rapport ammoniacal régénéré/ammoniacal assimilé (Codispoti, Friederich, 1978), apport par le zooplancton (Smith, Whitley, 1977) ou le benthos (Rowe *et al.*, 1977). La comparaison des caractéristiques de stations côtières réalisées avec des conditions de remontée d'eau modérée et intense (tableau 4) montre que si, en période majeure, ces fortes valeurs peuvent avoir une origine seulement locale, en période mineure, un apport par l'eau de remontée est probable. Dans ce dernier cas, les caractéristiques physiques et chimiques sont proches de celles de l'eau sous-jacente plus au large (≥ 10 μatg.l<sup>-1</sup> N-NO<sub>3</sub>; sous-saturation en oxygène). Dans le premier cas au contraire, l'isolement est bien mis en évidence

aussi bien par les valeurs plus élevées de température et de salinité que par les valeurs d'oxygène dissous proches de la saturation. La présence de sels nutritifs et la faible teneur en chlorophylle peuvent être interprétées par l'inhibition de l'assimilation de l'azote nitrique par l'azote ammoniacal (Coste, Slawyk, 1974) ou par la turbidité de ces eaux (Codispoti, Friederich, 1978).

### CONCLUSIONS

Ainsi, l'explication des distributions des sels nutritifs, et plus particulièrement de l'azote nitrique, repose pour la plus grande part sur les processus physiques liés aux remontées d'eau, eux-mêmes dépendant étroitement de la variation des conditions météorologiques. La variation de la part de chacune des deux eaux centrales joue un rôle secondaire et l'activité biologique a, pour cette zone, une influence mineure à l'exception de certaines périodes de transition bien déterminées. Au contraire, c'est la combinaison des processus physiques et de l'activité biologique qui permet d'interpréter les distributions de l'azote ammoniacal.

Durant cette campagne, l'aire étudiée apparaît comme une « zone source » d'eaux de remontée dans laquelle la production phytoplanctonique n'est qu'occasionnellement élevée. La plus grande partie de l'assimilation des sels nutritifs a certainement lieu au cours de la dérive de ces eaux vers un secteur situé au large et plus au sud.

### Remerciements

Les données qui ont servi de base à ce travail ont été obtenues par l'ensemble de l'équipe scientifique de la campagne Cineca-Charcot V dirigée par MM. J. Gostan et P. Nival. Nous remercions plus particulièrement

Tableau 4

Caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des eaux superficielles de stations côtières avec des conditions de remontée d'eau modérée (A) et intense (B).

Physical, chemical and biological surface water data for coastal stations with weak (A) and strong (B) upwelling.

	Station N°	Température (°C)	Salinité (‰)	O <sub>2</sub> (ml.l <sup>-1</sup> )	% saturation (%)	N-NO <sub>3</sub> N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		Chl. <i>a</i> (mg. m <sup>-3</sup> )
						(μatg.l <sup>-1</sup> )		
A	72	16,0	36,1	4,2	76	11,5	1,3	-
	77	15,6	36,1	4,0	71	12,1	1,8	1,1
B	15	16,8	36,3	5,2	95	6,4	1,8	1,9
	58	17,1	36,3	5,1	95	2,7	1,4	1,1

MM. P. David, Y. Marty et G. Slawyk qui ont pris une part importante dans l'analyse des sels nutritifs, ainsi que M<sup>mc</sup> M. C. Bonin pour son aide dans la préparation du manuscrit.

*Note* : Ce travail a été réalisé dans le cadre des objectifs de recherche des formations LA 41 et RCP 247 du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS).

## RÉFÉRENCES

- Barber R. T., 1977. The Joint-I expedition of the coastal upwelling ecosystems analysis program, *Deep-Sea Res.*, **24**, 1-6.
- Barber R. T., Huntsman S. A., 1975. Joint-I carbon, chlorophyll, and light extinction. RV Atlantis II cruise 82, *CUEA Data Report*, **14**, 165 p.
- Barton E. D., Pillsbury R. D., Smith R. L., 1975. *A compendium of physical observations from Joint I, vertical sections of temperature, salinity and sigma-t from R/V Gilliss data and low-pass filtered measurements of wind and currents*, Oregon State University, School of Oceanography, ref. 75-17, 60 p.
- Barton E. D., Huyer A., Smith R. L., 1977. Temporal variation observed in the hydrographic regime near Cabo Corveiro in the northwest African upwelling region February to April 1974, *Deep-Sea Res.*, **24**, 7-23.
- Carpenter J. H., 1965. The Chesapeake Bay Institute technique for the Winkler dissolved oxygen method, *Limnol. Oceanogr.*, **10**, 141-143.
- Codispoti L. A., Friederich G. E., 1978. Local and mesoscale influences on nutrient variability in the Northwest African upwelling region near Cabo Corveiro, *Deep-Sea Res.*, **25**, 751-770.
- Codispoti L. A., Dugdale R. C., Minas H. J., 1982. A comparison of the nutrient regimes off Northwest Africa, Peru and Baja California, *R. PV Cons. Int. Explor. Mer*, **180**, 177-194.
- Coste B., 1971. Circulation et évolution des composés de l'azote et du phosphore (en particulier des sels nutritifs) dans le bassin occidental de la Méditerranée. Influence sur la production organique, *Thèse Doct. État, Univ. Aix-Marseille II*, 256 p.
- Coste B., Slawyk G., 1974. Structures de répartitions superficielles des sels nutritifs dans une zone d'upwelling (Cap Corveiro, Sahara espagnol), *Téthys*, **6**, 123-132.
- Coste B., Nival P., Minas H. J., 1982. Analyse des relations entre les conditions hydrologiques, les sels nutritifs et la chlorophylle des eaux superficielles d'une zone d'upwelling (côtes de Mauritanie, mars/avril 1974), *R. PV Cons. Int. Explor. Mer*, **180**, 101-106.
- Cruzado A., 1974. Coastal upwelling between Cape Bojador and Point Durnford (Spanish Sahara), *Téthys*, **6**, 133-142.
- Fraga F., 1973. Oceanografía química de la region de afloramiento del noroeste de Africa. I., *Res. Exp. Cient. B/O Cornide*, **2**, 13-52.
- Fraga F., 1974. Distribution des masses d'eau dans l'upwelling de Mauritanie, *Téthys*, **6**, 5-10.
- Friebertshausen M. A., Codispoti L. A., Bishop D. D., Friederich G. E., Westhagen A. A., 1975. Joint I hydrographic station data. RV Atlantis II Cruise 82, *CUEA Data Report*, **18**, 243 p.
- Friederich G. E., Codispoti L. A., 1979. On some factors influencing dissolved silicon distribution over the northwest African shelf, *J. Mar. Res.*, **37**, 337-353.
- Furnestin J., 1959. Hydrologie du Maroc atlantique, *Rev. Trav. Inst. Pêches Mar.*, **23**, 5-78.
- Groupe Medipro, 1974. Résultats de la campagne Cineca-Charcot II (15 mars-29 avril 1971), *Publ. CNEOX, sér. Résultats des campagnes à la mer*, **7**, 138 p.
- Groupe Medipro, 1976. Résultats de la campagne Cineca 5-J. Charcot-Capricorne 7403 (1<sup>er</sup> mars au 20 avril 1974), *Publ. CNEOX, sér. Résultats des campagnes à la mer*, **10**.
- Hughes P., Barton E. D., 1974a. Physical investigations in the upwelling region of North West Africa on RRS Discovery Cruise 48, *Téthys*, **6**, 43-52.
- Hughes P., Barton E. D., 1974b. Stratification and water mass structure in the upwelling area off Northwest Africa in April/May 1969, *Deep-Sea Res.*, **21**, 611-628.
- Huntsman S. A., Barber R. T., 1977. Primary production off Northwest Africa: the relationship to wind and nutrient conditions, *Deep-Sea Res.*, **24**, 25-33.
- Jones B. H., Halpern D., 1981. Biological and physical aspects of a coastal upwelling event observed during March-April 1974 off Northwest Africa, *Deep-Sea Res.*, **28**, 71-81.
- Jones P. G. W., 1972. The variability of oceanographic observations off the coast of NW Africa, *Deep-Sea Res.*, **19**, 405-431.
- Jones P. G. W., Folkard A. R., 1970. Chemical oceanographic observations off the coast of NW Africa with special reference to the process of upwelling, *R. PV Cons. Int. Explor. Mer*, **159**, 38-60.
- Le Borgne R., 1978. Ammonium formation in Cape Timiris (Mauritania) upwelling, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **31**, 253-265.
- Le Corre P., Tréguer P., 1976. Contribution à l'étude de la matière organique dissoute et des sels nutritifs dans l'eau de mer. Caractéristiques chimiques du golfe de Gascogne et des upwellings côtiers de l'Afrique du Nord-Ouest, *Thèse Doct. État, Univ. Bretagne occidentale, Brest*, 490 p.
- Margalef R., 1971. Una campana oceanografica del "Cornide de Saavedra" en la region de afloramiento del noro-este Africano, *Invest. Pesq.*, **35**, suppl., 1-39.
- Minas H. J., Minas M., Coste B., 1978. Rôle de l'oxygène dans le système production-régénération des résurgences côtières NW africaines (zone Cineca, Cap Corveiro-Cap Blanc), *Symposium on the Canary Current, upwelling and living resources*, communication n° 69, 17 p. (manuscrit non publié).
- Minas H. J., Codispoti L. A., Dugdale R. C., 1982. Nutrients and primary production in the upwelling region off Northwest Africa, *R. PV Cons. Int. Explor. Mer*, **180**, 141-176.
- Mittelstaedt E., Pillsbury R. D., Smith R. L., 1975. Flow patterns in the northwest african upwelling area. Results of measurements along 21°40'N during February-April 1974. Joint I, *Dtsch Hydrogr. Z.*, **28**, 145-167.
- Pillsbury R. D., Bottero J. S., Still R. E., Mittelstaedt E., 1975. Wind, currents and temperature off Northwest Africa along 21°40'N during Joint I, February-April 1974, *Data Rep. Oregon State Univ.*, **62**.
- Rowe G. T., Clifford C. H., Smith K. L. Jr., 1977. Nutrient regeneration in sediments off Cap Blanc, Spanish Sahara, *Deep-Sea Res.*, **24**, 57-63.
- Schemainda R., Nehring D., Schulz S., 1975. Ozeanologische Untersuchungen zum Produktionspotential der nordwestafrikanischen Wasserauftriebsregion 1970-1973, *Geod. Geophys. Veröff.*, **4**, 16, 85 p.
- Shaffer G., 1976. A mesoscale study of coastal upwelling variability off NW Africa. "Meteor" *Forsch-Ergebnisse*, **A 17**, 21-72.
- Slawyk G., 1980. L'absorption de composés azotés par le phytoplancton marin : rôle dans la production primaire. Relations avec la photosynthèse et les variables du milieu extra- et intracellulaire, *Thèse Doct. État, Univ. Aix-Marseille II*, 213 p.
- Slawyk G., MacIsaac J. J., 1972. The kinetics of nitrate and ammonium uptake by natural populations of marine phytoplankton, *Deep-Sea Res.*, **16**, 415-422.
- Small L. F., Menzies D. M., 1981. Patterns of primary productivity and biomass in a coastal upwelling region, *Deep-Sea Res.*, **28**, 123-149.
- Smith S. L., Whitledge T. E., 1977. The role of zooplankton in the regeneration of nitrogen in a coastal upwelling system off Northwest Africa, *Deep-Sea Res.*, **24**, 49-56.
- Strickland J. D. H., Parsons T. R., 1968. A practical handbook of seawater analysis, *Bull. Fish. Res. Board Can.*, **167**, 310 p.
- Stuart D. W., Buchwalter T., Garcia-Mettin J., 1975. *Joint I meteorological data*, Florida State University Data Report CUEA, 75-3.
- Sverdrup H. U., Johnson M. W., Fleming R. H., 1942. *The oceans; their physics, chemistry, and general biology*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1087 p.
- Thiriou A., 1973. Résultats de la campagne Cineca-Charcot I (22 janvier-15 février 1971). I. Présentation de la campagne, *Publ. CNEOX, sér. Résultats des campagnes à la mer*, **6**, 188 p.
- Tomczak M. Jr., 1978. De l'origine et la distribution de l'eau remontée à la surface au large de la côte nord-ouest africaine. *Annal. Hydrogr.*, **6**, sér. 5, 5-14.
- Tréguer P., Le Corre P., 1979. The ratios of nitrate, phosphate, and silicate during uptake and regeneration phases of the Moroccan upwelling regime, *Deep-Sea Res.*, **26**, 163-184.
- Voituriez B., Dufour P., Le Borgne R., 1974. Preliminary results on R/V Capricorne 7402 Cruise in Cape Blanc, *CUEA Newslett.*, **3**, 1-7.
- Walsh J. J., Whitledge T. E., Kelley J. C., Huntsman S. A., Pillsbury R. D., 1977. Further transition status of the Baja California upwelling ecosystem, *Limnol. Oceanogr.*, **22**, 264-280.
- Weichert G., 1970. Kontinuierliche Registrierung der Temperatur und der Phosphat-Konzentration im Oberflächenwasser des nordwestafrikanischen Auftriebswasser-Gebietes, *Dtsch Hydrogr. Z.*, **23**, 49-60.
- Weiss R. F., 1970. The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater, *Deep-Sea Res.*, **17**, 721-735.
- Wooster W. S., Bakun A., McLain D. R., 1976. The seasonal upwelling cycle along the eastern boundary of the North Atlantic, *J. Mar. Res.*, **34**, 131-141.