

Conditions hydrologiques et chimiques associées à l'upwelling côtier du Portugal en fin d'été

Résurgences côtières
Portugal
Hydrologie
Sels nutritifs
Oxygène dissous
Coastal upwelling
Portugal
Hydrography
Nutrients
Dissolved oxygen

B. COSTE^a, A. F. G. FIÚZA^b, H. J. MINAS^a

^a Centre d'Océanologie de Marseille, Faculté des Sciences de Luminy, 13288 Marseille Cedex 09, France.

^b Grupo de Oceanografia, Departamento de Física e Centro de Geofísica, Universidade de Lisboa, Rua de Escola Politécnica, 58, 1200 Lisboa, Portugal.

Reçu le 19/2/85, révisé le 5/12/85, accepté le 11/12/85.

RÉSUMÉ

Les caractéristiques hydrologiques et chimiques des eaux d'une zone de remontée (upwelling) des côtes portugaises ont été étudiées du 28 août au 19 septembre 1981 au cours de la campagne RCA-1 du N.O. Jean-Charcot. La réalisation à 7 reprises d'une même radiale à la hauteur du Cap Siñes (38°N) a permis d'observer la variabilité de ces structures.

La période étudiée constitue une phase de faible activité de la remontée marquée par le rapprochement de la côte d'eaux superficielles du large plus chaudes et plus salées (à une vitesse d'environ 5 km par jour) et par l'enfoncement progressif des isoplèthes des différents paramètres dans la région côtière. Cette évolution est la conséquence de l'affaiblissement (de 6 à 1 m/s) de l'intensité de la composante nord du vent local, favorable à l'upwelling.

Des calculs géostrophiques montrent que la distribution côte-large des paramètres hydrologiques est aussi fortement déterminée par un système de courants méridionaux. Ce système est composé fondamentalement par un jet de moyenne échelle portant au sud sur le talus continental, et par une recirculation vers le nord, à plus de 100 km de la côte.

Les traces d'une période de remontée plus active ayant précédé la campagne sont apparentes dans les caractéristiques chimiques et biologiques — épuisement en sels nutritifs, sursaturation en oxygène dissous, biomasse phytoplanctonique assez élevée — des eaux superficielles côtières dont les propriétés thermohalines montrent l'origine subsurface.

En profondeur, pour des caractéristiques thermohalines identiques, les eaux centrales sont plus riches en sels nutritifs ($\approx 4 \mu\text{atg/L N-NO}_3$) et leurs teneurs en oxygène dissous sont plus faibles ($\approx 0,5 \text{ ml/L}$) près de la côte qu'au large. Ceci est attribué à la reminéralisation du matériel particulaire organique sédimentant des couches superficielles,

Oceanol. Acta, 1986, 9, 2, 149-158.

ABSTRACT

Hydrological and chemical conditions associated with the Portuguese coastal upwelling during late summer

The hydrological and chemical features of coastal waters in an upwelling area off Portugal were investigated from 28 August to 19 September 1981, during the RCA-1 cruise of the R/V Jean-Charcot. Sevenfold repetition of a particular oceanographic section at the latitude of Cape Siñes (38°N) has permitted analysis of the variability of these structures.

The studied period corresponds to a phase of weak upwelling activity marked by a coastward displacement of warmer and saltier offshore surface waters at a rate of about 5 km/day and by the progressive deepening of the isopleths of the various fields in the nearshore zone. Such evolution is related to a general weakening (from 6 to

1 m/s) in the intensity of the northerly component of the local wind, favourable to upwelling.

Geostrophic computations indicate that the cross-shelf distribution of hydrographic properties is also strongly controlled by a meridional current system, basically composed of a southward mesoscale jet over the slope and by a northward recirculation at more than 100 km from the coast.

The signature of an active upwelling event that has occurred prior to the cruise was still apparent in the biological and chemical characteristics (nutrient depletion, oversaturation of dissolved oxygen, high phytoplankton biomass) of the near-surface coastal waters. Furthermore, the thermohaline properties of these waters clearly indicated a subsurface origin.

In deeper layers, central waters with identical thermohaline characteristics are richer in nutrients ($\approx 4 \mu\text{g-at/LN-NO}_3$) and poorer in dissolved oxygen ($\approx 0,5 \text{ ml/L}$) near the coast than offshore. This is attributed to the remineralization of particulate organic matter falling out from the upper layers,

Oceanol. Acta, 1986, 9, 2, 149-158.

INTRODUCTION

Au cours des dernières années, particulièrement entre 1970 et 1978, les zones de remontée d'eau des côtes nord-ouest africaines ont fait l'objet de nombreuses campagnes, souvent pluridisciplinaires. La plupart se sont déroulées dans le cadre du programme international CINECA (Cooperative Investigation of the Northern Part of the Eastern Central Atlantic) dont les objectifs principaux étaient: d'une part, la description des caractéristiques océanographiques et des ressources vivantes, et d'autre part, l'analyse du phénomène de remontée d'eau et de ses conséquences biologiques. Les résultats obtenus ont donné matière à de très nombreuses publications et à 4 symposia tenus à Barcelone (1970), Marseille (1973), Kiel (1975) et Las Palmas (1978). Ainsi, la région comprise entre le Sénégal et le Maroc est-elle l'une des zones océaniques les mieux connues.

Les côtes ouest-portugaises de la péninsule ibérique, pourtant intéressées elles aussi pendant les mois d'été par des remontées d'eau côtière apparemment associées aux mêmes causes (Wooster *et al.* 1976), n'ont pas bénéficié d'un tel intérêt. La majorité des travaux sur cette zone a été limitée à l'océanographie physique. Madelain (1967), par l'analyse de données hydrologiques obtenues en été au large de la péninsule ibérique, a montré l'existence de ce phénomène entre le Cap Finistère et le Cap Saint-Vincent. Mais c'est seulement très récemment que de nombreux travaux ont été consacrés à l'étude des remontées d'eau de cette région. En analysant les données historiques des températures de surface et des variations des conditions météorologiques en divers points des côtes portugaises, Fiúza *et al.* (1982) ont établi les caractéristiques principales de ces zones de remontée d'eau, sur la base de moyennes mensuelles avec une résolution spatiale de 1° de latitude. Ils montrent que les vents (les « alizés portugais ») soufflent favorablement aux remontées d'eau en suivant l'évolution méridienne du front atmosphérique subtropical. A l'échelle climatologique, la période de remontée d'eau se situe entre juillet et septembre, en retard d'un mois par rapport aux vents. D'autre part, ces auteurs mettent en évidence des variations interannuelles dans

l'intensité des remontées d'eau (quantifiée par les écarts de température entre les eaux côtières et du large) reliées à la variabilité de la composante nord des vents côtiers. Fraga (1981) et Fraga *et al.* (1982), par l'hydrologie au large des côtes espagnoles de la Galice, mettent aussi en évidence la présence de remontée d'eau côtière au cours de l'été. Enfin, en utilisant des thermographies de surface obtenues par télédétection à partir de satellites ou d'avions, Fiúza (1983) a précisé la variabilité à plus petite échelle spatio-temporelle. Il a en particulier montré que l'intensité et l'extension des remontées d'eau qui intéressent l'ensemble des côtes portugaises sont sous la dépendance étroite des vents locaux et sont influencées par la bathymétrie et par la morphologie des côtes. Au cours de périodes de 6 à 7 jours pendant lesquelles les vents côtiers soufflent du secteur nord, les eaux de remontée, identifiées par leurs basses températures, couvrent en surface une largeur de 100 à 200 km, et présentent des structures à moyenne échelle, comme des plumes et des tourbillons; pendant les périodes de vents faibles la zone de remontée des eaux ne s'étend pas à plus de 30 à 50 km de la côte.

Cet article a pour but de contribuer à une connaissance plus complète du phénomène de remontée d'eau des côtes portugaises. Fondé sur des données hydrologiques (température et salinité) et chimiques (sels nutritifs, oxygène dissous) obtenues au cours de la campagne RCA-1 (Résurgence Côtière Atlantique), il constitue la première étude pluridisciplinaire de cette zone. Ses objectifs sont de décrire la variabilité à court terme (3-4 jours) et à moyenne échelle spatiale (environ 20 km) des structures hydrologiques et chimiques, et de mettre en évidence les causes de cette variabilité. Par ailleurs, on envisage de caractériser les eaux par leur richesse en sels nutritifs.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

La campagne RCA-1 du N. O. Jean Charcot a eu lieu du 28 août au 19 septembre 1981. Elle s'est déroulée dans la zone comprise entre $37^\circ 50' \text{N}$ et $38^\circ 10' \text{N}$ et entre la côte portugaise et $10^\circ 20' \text{W}$ (fig. 1). Au total, 61 stations, espacées de 5 à 10 milles, ont été exécutées

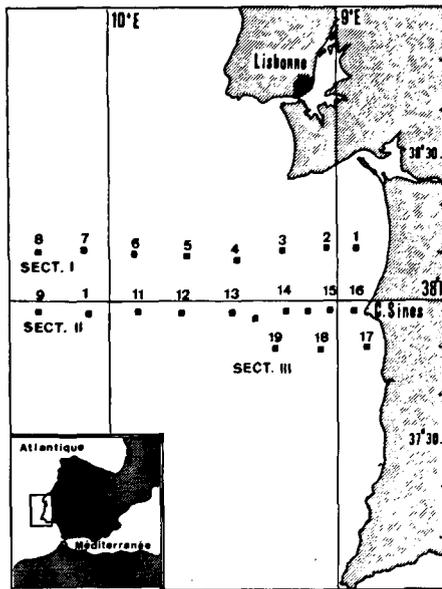


Figure 1
Positions des stations occupées durant la campagne le long des sections I, II et III. La section II a été exécutée à 7 reprises.
Location of the stations occupied during the cruise along sections I, II and III. Section II was repeated 7 times.

Tableau 1
Position, date et durée des 9 radiales réalisées durant la campagne.
Location, date and duration of the 9 profiles conducted during the cruise.

Section	Radiale	Latitude moyenne	Stations	Date	Durée (heures)
I	1	38°10'	1 à 8	30-31/8	28
II	2	37°58'	9 à 16	31/8-1/9	26
III	3	37°50'	17 à 19	1/9	6
II	4	37°58'	20 à 26	2-3/9	34
II	5	37°58'	27 à 33	4-5/9	34
II	6	37°58'	36 à 42	7-8/9	23
II	7	37°58'	43 à 46	11/9	9
II	8	37°58'	49 à 55	13-14/9	32
II	9	37°58'	57 à 61	15-16/9	22

sur 9 radiales (tab. 1); 7 de ces radiales ont été réalisées sur le parallèle du Cap Siões. Ce choix a été guidé par les résultats de travaux antérieurs sur les zones de remontée d'eau des côtes portugaises, Fiúza *et al.* (1982) ayant établi qu'à l'échelle climatique mensuelle, l'intensité de la remontée est maximale au voisinage de la latitude du Cap Siões. L'extension des radiales vers le large (environ 150 km) a été choisie à partir des conclusions de Fiúza (1982) sur les dimensions de la zone influencée par les eaux de remontée au large du Cap Siões; sur place, elle a été limitée au vu des caractéristiques hydrologiques superficielles mesurées en continu au moyen d'un thermosalinographe (Thévenot, 1983).

Les prélèvements ont été réalisés avec des bouteilles N.I.O. de 1,2 l de capacité aux immersions standard jusqu'à 1000 m de profondeur, à l'exception de la radiale 5 où des prélèvements ont été effectués tous les 50 m entre 100 et 1000 m, et de la radiale 8 où des prélèvements ont été effectués par des prises d'échantillons tous les 100 m de 1000 à 1500 m.

L'ensemble des résultats, le détail des travaux réalisés au cours de la campagne et les méthodes utilisées sont rassemblés dans un même document (Groupe MEDI-

PROD, 1983). Les températures étaient mesurées avec des thermomètres à renversement Richter et Wiese, les immersions exactes étant calculées à partir des indications de thermomètres non protégés. Les salinités étaient mesurées sur un salinomètre Beckman de type RS 7B. Dans cet article elles sont exprimées en USP (Unité de Salinité Pratique, UNESCO, 1978). Les concentrations en oxygène dissous ont été obtenues par titrage manuel suivant la méthode de Winkler avec les adaptations de Carpenter (1965); les pourcentages de saturation ont été calculés par les formules de Weiss (1970). Les sels nutritifs (nitrates, nitrites, silicates) ont été mesurés par des méthodes colorimétriques automatiques sur des analyseurs Chemlab en suivant les modes opératoires décrits par Tréguer et Le Corre (1975). Les données météorologiques (force et direction du vent) ont été relevées toutes les trois heures à bord du Jean Charcot. Elles seront utilisées qualitativement, et n'ont fait l'objet d'aucun traitement (moyenne, lissage...).

RÉSULTATS

Le diagramme T-S collectif des données de la campagne (fig. 2) fait apparaître les masses d'eaux présentes dans cette région entre la surface et 1500 m. Il est formé de 3 entités :

- Un ensemble de points dispersés, correspondant à des salinités et températures relativement élevées, représentatifs des eaux superficielles.
- Des points quasiment alignés suivant un segment d'extrémités $S=36,2$; $T(^{\circ}C)=15$ et $S=35,6$; $T(^{\circ}C)=11$, dont l'une est marquée par un minimum de salinité. Ces points représentent la couche d'eau centrale correspondant à la partie supérieure de la thermocline permanente. Sur la figure 2 sont reportées l'Eau Centrale Nord-Atlantique (ECNA) selon Sverdrup *et al.* (1942) et l'« Eastern North Atlantic Central Water » (ENAW) définie par Fiúza et Halpern

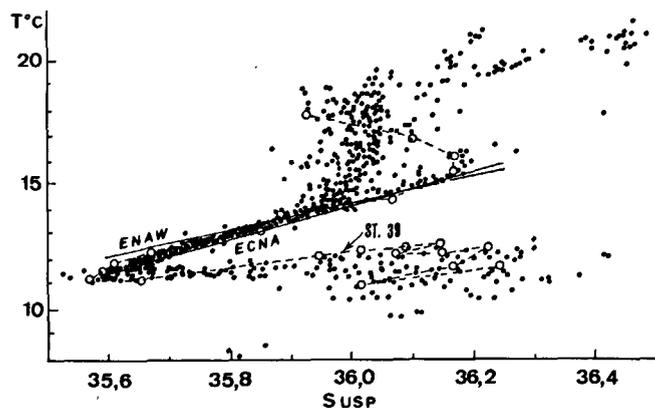


Figure 2
Diagramme T-S de l'ensemble des prélèvements effectués au cours de la campagne. ECNA et ENAW représentent les eaux centrales définies par Sverdrup *et al.* (1942) et Fiúza et Halpern (1982). Le diagramme T-S de la station 39 (en tireté) met en évidence l'existence de plusieurs veines d'eau méditerranéenne.
TS scatter plot relative to the observations conducted during the cruise. ECNA and ENAW represent central water characteristics as defined respectively by Sverdrup *et al.* (1942) and by Fiúza and Halpern (1982). The broken line is the TS diagram for station 39 and illustrates the presence of several cores of water of Mediterranean origin.

(1982) comme formée au sud-ouest des Açores et remontant jusqu'au large du Portugal. Des travaux récents (Fiúza, 1984) confirment l'origine est-atlantique de l'eau centrale présente au large du Portugal.

— En-dessous de l'eau centrale, un groupe de points assez dispersés et couvrant une large gamme de salinités. Ils représentent des eaux qui résultent du mélange de l'eau centrale, des eaux d'origine méditerranéenne et d'eaux plus profondes (cf. Madelain, 1967; Ambar, 1983).

Le diagramme T-S individuel de la station 39, représenté en tireté sur la figure 2, apporte des informations supplémentaires. La frontière entre l'eau centrale et la couche influencée par l'eau d'origine méditerranéenne y est très nette et marquée par un brusque décrochement de la salinité. La présence de plusieurs veines d'eau « méditerranéenne », bien connues dans le golfe de Cadix et récemment décrites le long des côtes ouest-portugaises (Ambar, 1983), est confirmée à la latitude du Cap Siñes par la présence de maxima relatifs de la salinité et de la température. Leurs plus faibles teneurs en éléments nutritifs permettent également de les identifier.

La dispersion des points correspondant à la couche superficielle et leur manque d'organisation apparent peuvent être expliqués à partir des diagrammes T-S station par station. La figure 3, relative aux stations de la radiale n°1, met en évidence les caractéristiques de la couche située au-dessus de l'eau centrale non modifiée telles qu'elles sont rencontrées tout au long de cette campagne, bien que parfois la situation soit plus complexe dans le détail. Entre l'eau de surface et le premier point qui appartient à l'eau centrale, la liaison sur le plan T-S est pratiquement rectiligne, à salinité quasi constante, indiquant un effet primordial du réchauffement. Ce schéma montre également que la couche superficielle n'est pas homogène, la densité croissant régulièrement avec la profondeur (d'environ 0,015 sigma-t/m), sous l'effet de la différence de température.

La comparaison station par station de cette partie du diagramme T-S met en évidence les différences de

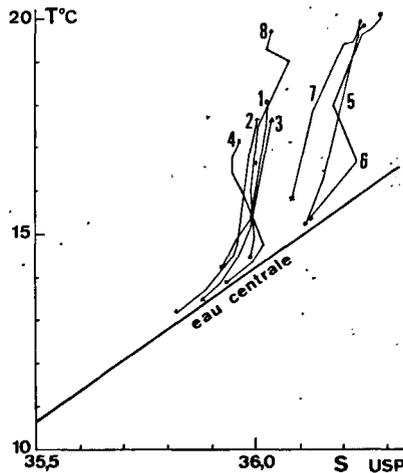


Figure 3

Représentation des caractéristiques T-S entre la surface et la première immersion de l'eau centrale non modifiée, pour les stations de la radiale N°1.

TS diagrams relative to the layers between the surface and the top of unmodified central water at the stations of profile 1.

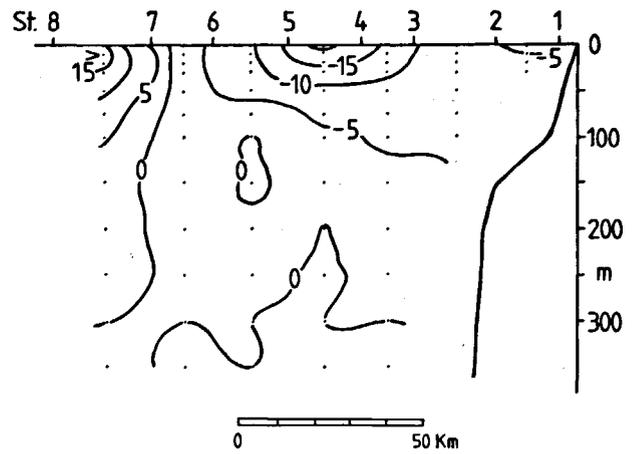


Figure 4

Coupes représentant la distribution de la vitesse géostrophique (en cm/s) normale à la radiale N°1, calculée relativement à 300 db (les valeurs négatives indiquent des composantes dirigées vers le sud).

Distribution of the geostrophic velocity component (in cm/s) normal to section 1, computed relatively to 300 db (negative values represent southward flows).

structure de cette couche d'eau entre la côte et le large. Pour les stations de chacun de ces deux groupes, les points sont alignés suivant une direction qui est sensiblement la même. Les quatre stations les plus côtières (stations 1 à 4) ont leurs points représentatifs pratiquement confondus. Les stations intermédiaires (stations 5 et 6) se distinguent nettement et apparaissent comme le résultat du réchauffement d'une couche d'eau centrale plus chaude et plus aisée que celle présente aux stations précédentes.

Cette disposition générale en deux groupes distincts est à attribuer au phénomène de remontée d'eau qui a pour conséquence de faire intervenir dans les couches supérieures des eaux côtières des eaux centrales d'origine plus profonde (température et salinité plus faibles) que celles qui se trouvent en surface au large.

Cependant, la station 8, la plus au large, a des caractéristiques très voisines de celles des premières; la différence la plus marquante étant des eaux de surface plus chaudes, conséquence d'une durée plus longue de réchauffement. Quant à la station 7, elle occupe une position intermédiaire. Le cas particulier des eaux de remontée qui se trouvent au large peut recevoir deux interprétations, toutes deux impliquant une origine côtière de ces eaux :

- soit elles proviennent directement d'une zone de remontée située plus au nord (noter le décrochement de la côte près de la latitude de Lisbonne; fig. 1);
- soit il s'agit d'eaux de remontée qui, après une dérive vers le sud, plus près de la côte, seraient entraînées vers le nord dans un mouvement tourbillonnaire anticyclonique.

La distribution des composantes des courants géostrophiques normales à la radiale N°1 (calculées relativement à un niveau de référence de 300 db), présentée sur la figure 4, indique que la deuxième hypothèse est la plus probable. En fait, la figure montre que les courbes supérieures (100 m) du groupe de stations fortement influencées par la remontée côtière (stations 1, 2, 3, 4) sont associées à des courants portant au sud, surtout à un « jet » de moyenne échelle sur

Tableau 2

Caractéristiques de l'Eau Centrale Supérieure (EC sup) pour les stations de la radiale N°1. ZEc=immersion (m); T=température (°C); NO₃=nitrate (µatg/L); O₂=concentration en oxygène dissous (ml/L); %=pourcentage de saturation en oxygène.

Characteristics of upper central water (EC sup) at the stations of profile 1. ZEc=depth (m); T=temperature (°C); NO₃=nitrate-nitrogen (µg-at/L); O₂=dissolved oxygen concentration (ml/L); %=percent of oxygen saturation.

N° St	1	2	3	4	5	6	7	8
ZEc	45	50	75	75	75	100	100	100
T°C	14,10	13,68	13,68	14,35	15,20	15,29	15,43	14,48
NO ₃	6,0	7,7	7,4	4,4	0,0	2,4	1,6	3,0
O ₂	4,96	4,92	4,92	5,16	5,23	5,26	5,28	5,31
%	86,1	84,7	84,7	90,1	92,9	93,7	94,3	92,9

le talus continental, tandis que celles de la station « anormale » (station 8) sont reliées à un courant vers le nord. Les stations présentant des caractéristiques océaniques (stations 5 et 6) se trouvent dans la transition entre ces deux circulations géostrophiques.

Dans une étude hydrodynamique plus détaillée prenant en compte des calculs géostrophiques avec les données de RCA-1 et des thermographies de la surface de la mer obtenues pendant la même période à partir de mesures d'avion et de satellite, dans le cadre du projet OCASO de l'Université de Lisbonne, Fiúza (1984) a montré que la même distribution relative côte-large de l'hydrologie et de la circulation qui vient d'être décrite pour la radiale N°1 se retrouve sur chacune des autres radiales de RCA-1 et, qu'en fait, les eaux de remontée trouvées au large du Cap Siñes pendant la campagne sont dues à une recirculation anticyclonique de moyenne échelle d'eaux provenant des résurgences côtières situées plus au nord, autour d'un noyau d'eau du large.

Ces observations démontrent bien le caractère tridimensionnel (variabilité suivant deux coordonnées horizontales — le long de la côte et vers le large — et une verticale — profondeur) associé à la remontée côtière. Toutefois, en fonction de la stratégie d'échantillonnage adoptée pour RCA-1, on se bornera ici à une analyse de la structure bidimensionnelle le long des radiales et de son évolution dans le temps.

Revenant à la discussion de la radiale N°1, si l'on interprète les diagrammes T-S de la couche superficielle par le réchauffement d'eau centrale supérieure (EC Sup), on s'aperçoit que les caractéristiques de EC Sup varient suivant les stations (tab. 2). Aux stations côtières correspond une eau centrale supérieure plus froide et moins salée dont l'origine est la plus profonde. Aux stations dont les eaux de surface sont les plus chaudes et les plus salées (stations 5 et 6) correspondent des eaux centrales d'origine plus superficielle. Aux stations 7 et 8, on trouve une situation intermédiaire. De la même manière, l'immersion de la partie supérieure de l'eau centrale varie suivant l'emplacement des stations: de 40-50 m près de la côte, elle atteint 100 m aux stations du large. Pour la teneur en éléments nutritifs (tab. 2), les eaux côtières sont donc doublement favorisées: les eaux centrales qui interviennent dans le processus de résurgence se trouvent à une immersion plus faible et ont une concentration en sels nutritifs plus élevée que celles plus au large.

La répartition des principaux paramètres sur la radiale devant Siñes (représentée par la radiale N°2, fig. 5) confirme cette analyse et met en évidence d'autres caractéristiques, en particulier le relèvement général des isolignes du large vers la côte. Ainsi, l'isoligne sigma-t = 26,6 qui se trouve à 70 mètres à la station 9, remonte à 20 mètres près de la côte et à 15 mètres à la station 14; de même, l'isoligne 1 µatg/L N-NO₃⁻ passe de 90 mètres de profondeur à environ 25 mètres contre la côte. Ce relèvement ne suffit pas pour apporter des eaux riches en sels nutritifs jusqu'à la couche euphotique. D'après les profils verticaux de l'intensité du flux photonique disponible pour la photosynthèse (PAR) obtenus au cours de la campagne (Lazzara, 1983), l'isoligne 1 µatg/L N-NO₃⁻ est toujours à une immersion très proche ou supérieure à celle du 1 % de cette intensité mesurée en surface (tab. 3). Aux stations côtières, des eaux riches en sels nutritifs peuvent recevoir plus de 1 % du flux photonique de surface mais jamais plus de 10 %. Ainsi, la présence dans la couche euphotique d'eaux riches en sels nutritifs, condition nécessaire au développement biologique dans les zones

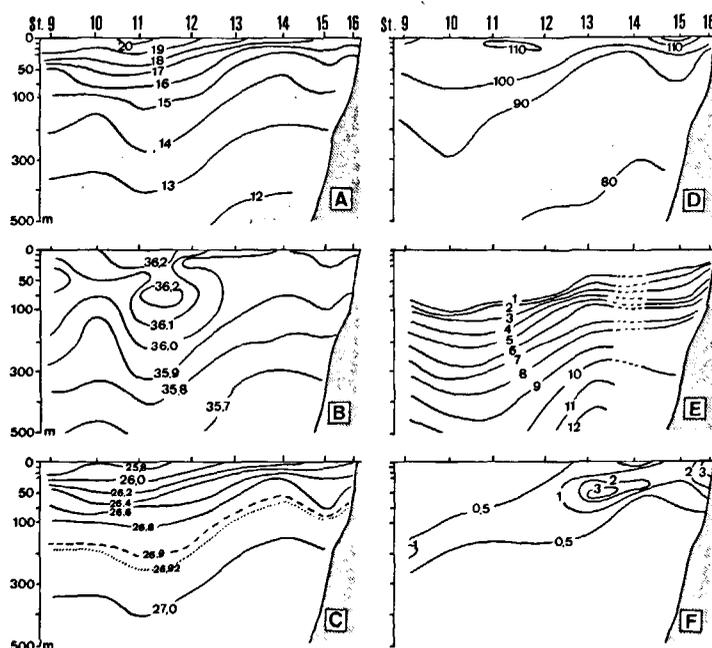


Figure 5

Coupe représentant les principaux paramètres sur la radiale N°2. A = température (°C); B = salinité (PSU); C = densité (σ_t); D = saturation en oxygène (%); E = azote nitrique (µatg/L); F = chlorophylle a (µg/L).

Le relèvement des isolignes à l'approche de la côte indique une faible remontée des eaux. Les eaux superficielles de l'ensemble de la zone sont caractérisées par des sursaturations en oxygène et un appauvrissement total en sels nutritifs.

Distribution of the main parameters along profile 2. A = temperature (°C); B = salinity (PSU); C = density (σ_t); D = oxygen saturation (%); E = nitrate-nitrogen (µg-at/L); F = chlorophyll a (µg/L). The upward trend of the isopleths towards the coast indicates weak upwelling conditions. In the whole area, surface waters are characterized by oxygen oversaturation and by total depletion in nutrients.

Tableau 3

Immersion où l'on trouve 10 et 1 % du flux photonique de surface (PAR) et 1 µatg/L N-NO₃⁻ pour diverses stations. L=stations du large; C=stations côtières; I=stations intermédiaires.

Depths at which 10 and 1% of photosynthetically available radiation (PAR) and 1 µg-at/L NO₃-N were found at several stations. L=offshore stations; C=coastal stations; I=intermediate stations.

N°St	10	16	24	30	41	44	52	55
Z 10 %	26	12	16	19	37	16	35	35
Z 1 %	56	28	40	48	70	32	60	75
Z 1 µatg/L	103	23	26	36	84	41	43	106
Situation	L	C	I	I	L	C	I	L

de remontée d'eau, n'a jamais été rencontrée. Cependant, la coupe des teneurs en chlorophylle *a* (fig. 4F) montre, plus particulièrement aux stations proches de la côte, des valeurs relativement fortes. Elles ne peuvent être attribuées qu'à une biomasse phytoplanctonique produite antérieurement au cours d'une phase de remontée plus intense. Les faibles concentrations concomitantes en sels nutritifs et les sursaturations en oxygène dissous sont la conséquence de la consommation par ce phytoplancton.

Deux autres observations aident à définir la situation hydrochimique générale de la zone étudiée durant cette période:

- la couche superficielle est formée par des eaux totalement appauvries en sels nutritifs et en état de sursaturation en oxygène. Cette situation s'apparente à celle des périodes de « relaxation » séparant des périodes actives de remontée d'eaux au large de la Mauritanie décrites par Barton *et al.* (1977). Pour les eaux de salinité inférieure à 36,0, reflet de leur origine subsuperficielle, les caractéristiques observées doivent être attribuées au développement phytoplanctonique;

- les tracés des isopycnes et des autres isoplèthes de la figure 4 présentent une remontée générale du large vers la côte avec, pour les eaux sous-jacentes, un maximum à la station 14. On peut remarquer aussi la distribution des concentrations en chlorophylle *a* qui, sauf tout près de la côte, présente un maximum subsuperficiel lequel est très marqué au niveau des stations 14 et 15. La structure à cet emplacement, également retrouvée sur les autres radiales, rappelle celle décrite dans les zones de dôme (Voituriez, Dandonneau, 1974). Une telle structure est liée, à l'ouest du relèvement maximum des isopycnes (la station 14 sur la radiale N° 2, fig. 5), à l'existence d'un jet portant au sud et, plus près de la côte, à celle d'un courant beaucoup plus faible portant au nord (Fiúza, 1984). Cet effet de cisaillement était d'ailleurs toujours présent dans la structure de la circulation géostrophique sur le talus supérieur (*cf.* fig. 4).

En définitive, les résultats obtenus mettent en évidence l'existence, tout au long de la campagne, de structures hydrologiques et chimiques relativement simples et stables, tout au moins aux échelles spatio-temporelles considérées. La dénivellation des isoplèthes d'environ 60 mètres dans la couche supérieure entre la côte et le large, ainsi que les gradients thermohalins horizontaux dans les couches superficielles, indiquent une résurgence côtière et correspondent à la « signature » hydrologique des cisaillements latéraux entre courants horizontaux.

La pauvreté en sels nutritifs et la sursaturation en oxygène des niveaux supérieurs sont la marque d'une période antérieure de plus forte activité biologique.

DISCUSSION

Variabilité spatio-temporelle

La répétition des stations sur une même section avec la fréquence et l'éloignement choisis (fig. 1 et tab. 1) permet d'étudier la variabilité à moyenne échelle des structures hydrologiques et chimiques d'une façon semblable à ce qui a été fait pour la zone de remontée des côtes nord-ouest africaines (Barton *et al.*, 1977; Codispoti, Friederich, 1978; Coste, Minas, 1982). Ainsi, l'évolution des températures de surface au cours de la campagne le long de la section située à 38°N (fig. 6A) met en évidence la variabilité observée dans les eaux superficielles. On retrouve la diminution générale des températures du large vers la côte; mais deux autres particularités apparaissent:

- les différentes isothermes se rapprochent de la côte au fur et à mesure du déroulement de la campagne. Ainsi l'isotherme 20°C qui se situe à environ 50 milles le 1^{er} septembre se trouve-t-elle à seulement 20 milles le 13; évolution régulière, sans brusque changement;
- des eaux de température inférieure à 17°C sont présentes près de la côte seulement au début de la campagne et n'y réapparaissent que tout-à-fait à la fin. Ces résultats traduisent une atténuation continue de la remontée d'eau à partir du début de la campagne avec une légère inversion à la fin. Ils sont confirmés par

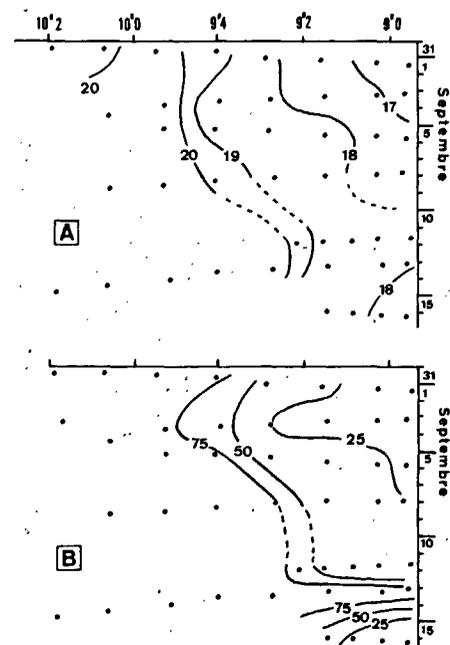


Figure 6

Variation des températures de surface (A) et de l'immersion du 1 µatg/L N-NO₃⁻ (B) le long de la section II pendant la campagne. On constate une avancée régulière vers la côte des eaux les plus chaudes concomitante à l'enfoncement des eaux contenant des sels nutritifs, sauf en fin de campagne où cette tendance se renverse.

Evolution of the sea surface temperatures (A) and of the depth of the 1 µg-at/L NO₃-N contour (B) along section II during the cruise. The general advance of warmer waters towards the shore is noticeable, with a simultaneous deepening of the nutrient-containing layers. A marked reversal of this trend took place by the end of the cruise.

l'examen des structures sous-jacentes. La figure 6B représente l'immersion à laquelle on trouve une concentration de $1 \mu\text{atg/L N-NO}_3^-$; dans la situation rencontrée, qui est caractérisée par la présence d'une couche superficielle dépourvue de sels nutritifs (fig. 5E), l'évolution de cet horizon peut donner une image de la remontée d'eau côtière. Au large, cette isoligne se trouve tout au long de la campagne à une immersion supérieure à 80 m. Près de la côte, au contraire, elle est en général à moins de 25 mètres. On note une évolution temporelle sensiblement identique à celle des isothermes de surface: l'immersion à 80 mètres de l'isoligne $1 \mu\text{atg/L}$ de nitrate se rapproche régulièrement de la côte et ne s'en éloigne que lors de la dernière radiale; de même, l'immersion à 25 m et moins se rencontre près de la côte au début et ne réapparaît que tout-à-fait à la fin. Cette représentation met également en évidence un autre phénomène: entre les radiales N° 7 et 8, l'immersion de l'isoligne $1 \mu\text{atg/L N-NO}_3^-$ aux stations proches de la côte passe de 40 à 80 mètres à 24 heures d'intervalles. Ces tendances et la brusque modification des structures sous-jacentes sur la radiale 8 sont confirmées par l'examen d'autres paramètres. Alors qu'au large la variabilité est faible, dans la zone côtière l'isotherme 15°C , l'isoligne $\sigma_t=26,60$ et l'isoligne $1 \mu\text{atg/L N-NO}_3^-$ (fig. 7A, B et C) suivent une évolution parallèle: lent enfoncement jusqu'à la radiale N° 7, décrochement sur la radiale N° 8 et remontée pour la radiale N° 9.

Parmi les facteurs influençant la variabilité des structures hydrologiques des zones de remontées, le vent local est généralement prépondérant comme de nombreux travaux l'ont montré. Ainsi Barton *et al.* (1977), pour une zone de résurgence des côtes de Mauritanie, ont clairement relié les apparitions en surface d'eaux sous-jacentes aux fluctuations du vent. Au cours de la campagne RCA-1, les conditions de vent (fig. 8) présentent les caractéristiques suivantes:

- l'intensité moyenne est faible, en général inférieure à 5 m/s , ce qui correspond à une situation intermédiaire entre celles décrites au large des côtes de Mauritanie par Barton *et al.* (1977) pour les périodes « mineures » de remontée d'eau et celles des périodes de « relaxation »;
- la direction du vent comporte toujours une composante portant au sud (donc localement favorable au phénomène de remontée d'eau) et une composante zonale, portant à l'est la plupart du temps. L'intensité de la composante nord-sud est presque toujours largement supérieure à celle de la composante ouest-est;
- la moyenne journalière n'a pas une forte variabilité, mais on observe un affaiblissement régulier de la composante nord depuis le début de la campagne ($\approx 6 \text{ m/s}$) jusqu'au 5-7 septembre où elle devient pratiquement nulle. On note ensuite un certain renforcement en fin de campagne.

Ces indications montrent un bon accord entre les conditions météorologiques et la situation hydrologique et chimique rencontrée: la présence de vents relativement constants et faibles, mais soufflant d'une direction favorable à la résurgence côtière selon le mécanisme élémentaire d'Eckman, entretient une circulation verticale qui maintient un relèvement des isopycnes près de la côte.

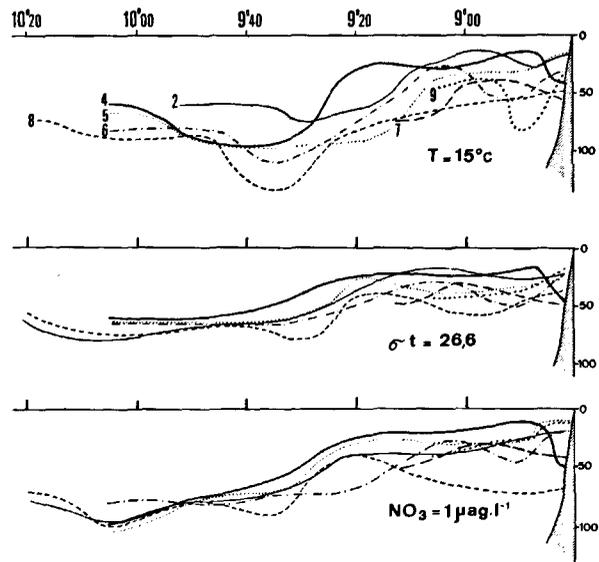


Figure 7

Variation de l'immersion des isolignes $T=15^\circ\text{C}$; $\sigma_t=26,6$; $\text{N-NO}_3=1 \mu\text{atg/L}$ sur les 7 radiales effectuées le long de la section II.

Variation of the depth of the isopleths $T=15^\circ\text{C}$, $\sigma_t=26.6$ and $\text{NO}_3-N=1 \mu\text{at/L}$ along the 7 profiles made at section II.

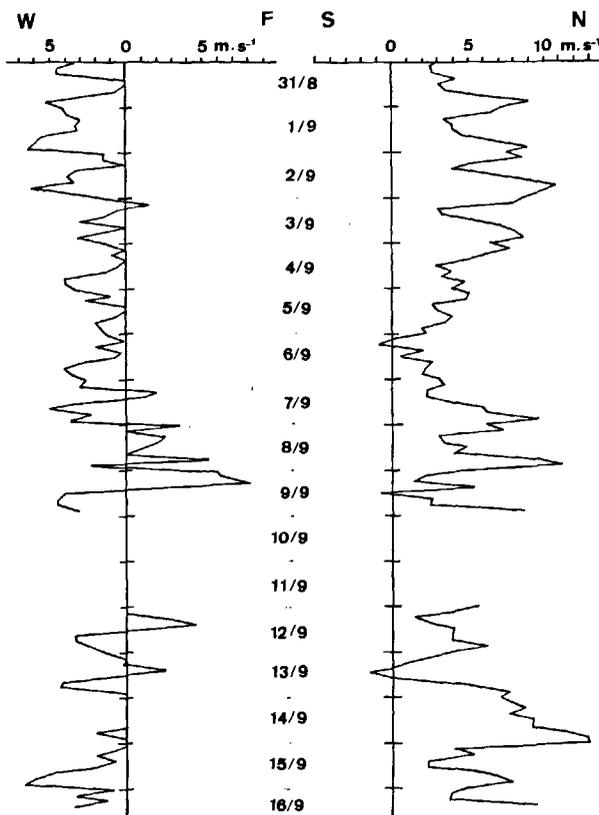


Figure 8

Variation des composantes N-S et E-W de la vitesse du vent (m/s) du 31 août au 16 septembre 1981 (mesures réalisées à bord du Jean-Charcot).

Evolution of the N-S and E-W wind components (m/s) between 31 August and 16 September 1981, from measurements carried out on board R/V Jean-Charcot.

Le lent enfoncement des isolignes des couches superficielles de la radiale N° 2 jusqu'à la radiale N° 7 (fig. 7) peut être attribué à l'affaiblissement général de la force du vent (fig. 8). De même, la remontée des isolignes observée sur la radiale N° 9 ainsi que le retour simultané de températures superficielles inférieures à 18°C

sont manifestement liés au renforcement du vent à partir du 14 septembre. Ces résultats montrent que, même pendant une période où les conditions favorables à une remontée d'eau restent très modérées, les structures hydrologiques et chimiques dans les couches superficielles sont très dépendantes de l'évolution du vent local. Cependant ce schéma n'explique pas parfaitement tous les détails des situations rencontrées, comme l'enfoncement maximal des différentes isolignes sur la radiale N° 8 (fig. 7) alors que les conditions de vent (fig. 8) et les isothermes de surface (fig. 6) ne présentent pas de modifications sensibles par rapport à celles de la radiale N° 7 réalisée 24 heures plus tôt. Ainsi que l'ont indiqué par exemple Walsh *et al.* (1977), la variabilité rencontrée dans les zones de résurgence a pour origine des processus physiques et biologiques de fréquences très diverses et des influences non locales qui peuvent se manifester (ondes longues, tridimensionnalité...).

Influence de la remontée d'eau sur les structures subsuperficielles

L'impact de la remontée d'eau et de l'enrichissement en sels nutritifs sur l'activité biologique des couches superficielles est bien connu puisque les zones intéressées constituent la principale source de matière vivante des océans. De plus les plateaux continentaux de ces régions, bénéficiant de la sédimentation d'une partie de la matière organique produite dans la couche d'eau sus-jacente, supportent-ils souvent une biomasse benthique très riche. En ce qui concerne les couches d'eaux sous-jacentes, peu de travaux ont été réalisés — sauf au large des côtes du Pérou où de nombreuses études sur l'oxydation de la matière organique et la dénitrification ont été faites (par exemple Codispoti, 1983).

La présence sur l'ensemble de la zone étudiée d'eau centrale, bien définie par ses caractéristiques thermohalines (fig. 2), facilite dans ce cas l'approche du problème. La comparaison des diagrammes T-S, SO₂ et S-NO₃⁻ correspondant à l'ensemble des prélèvements effectués dans l'eau centrale au cours de la campagne (fig. 9) fait apparaître d'une part, que la température, la concentration en oxygène dissous et la concentration en azote nitrique sont reliées d'une manière linéaire à la salinité (coefficients de corrélation: $r_{T,S}=0,988$; $r_{NO_3,S}=0,890$; $r_{O_2,S}=0,652$) et d'autre part, que la dispersion des points des diagrammes S-O₂ et S-NO₃⁻ (fig. 9 A et B) est largement supérieure à celle du diagramme T-S (fig. 2). Ceci peut être quantifié par le pourcentage de la variance résiduelle (VR) expliquée par le modèle linéaire qui fournit un indice de la variabilité autour de la droite estimée. On obtient respectivement VR T,S=2,3; VR S,O₂=57,5; VR S,NO₃=20,9 mettant en évidence la disparité entre le diagramme T-S et les diagrammes S-O₂ et S-NO₃⁻.

Cette dispersion n'est pas l'image d'une variabilité plus ou moins aléatoire mais provient de la représentation globale de ces diagrammes. En effet, une représentation station par station (fig. 9) donne un schéma beaucoup plus ordonné, les points d'une station étant en général pratiquement alignés. On peut donc dire que l'eau centrale d'une station est caractérisée par un certain

niveau de teneur en oxygène dissous et de concentration en nitrate. De plus, cette classification reflète une variabilité d'ordre géographique. La figure 10 regroupe les diagrammes S-O₂ et S-NO₃⁻ des stations les plus côtières (fig. 10 A, C) et des stations les plus au large (fig. 10 B, D). Elle montre que les eaux centrales des stations côtières sont parmi les moins riches en oxygène et les plus riches en nitrate. Les stations du large présentent une plus grande variabilité (qui peut atteindre 0,5 ml/L d'oxygène et 4 µatg/L N-NO₃⁻) mais leur teneur en oxygène dissous dépasse toujours celle des stations côtières.

La différenciation entre la côte et large peut être expliquée par l'activité biologique plus intense près de la côte avec, pour conséquence, une sédimentation plus importante de matériel organique, en partie reminéralisé dans l'eau centrale. La variabilité au large peut être attribuée aux fluctuations de la zone de remontée d'eau ou au système de circulation des eaux centrales dans cette région.

Un phénomène semblable se retrouve plus au nord au large des côtes espagnoles intéressées elles aussi par des remontées d'eau. Les données de la campagne Galicia I (Manriquez *et al.*, 1976) qui s'est déroulée aussi en fin de saison d'upwelling au nord-ouest du cap Finisterre (septembre 1974), nous permettent de montrer, pour les eaux centrales de mêmes caractéristiques thermohalines (fig. 11 A), l'existence à 43°30'N d'un gradient dans la concentration en oxygène dissous (fig. 11 B) et la teneur

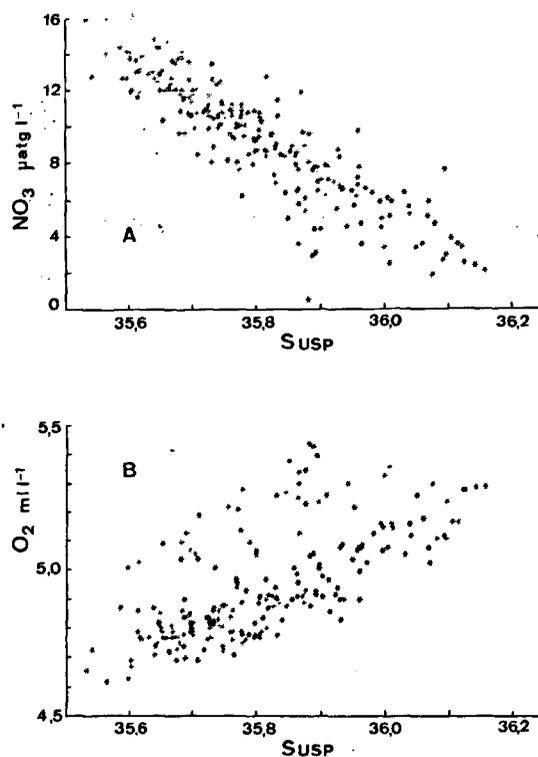


Figure 9

Diagrammes salinité-nitrate (A) et salinité-oxygène (B) pour les prélèvements effectués dans la couche d'eau centrale durant l'ensemble de la campagne. Contrairement au diagramme T-S, ces deux diagrammes font apparaître une forte dispersion expliquée par une activité biologique (consommation d'oxygène et reminéralisation de l'azote). Salinity/nitrate and salinity/oxygen multi-plots relative to all data obtained during the cruise within the central water mass. In opposition to the TS plot, these diagrams show strong scattering due to biological activity (oxygen consumption and nitrogen remineralization).

Figure 10

Diagrammes salinité-oxygène et salinité-nitrate des points représentatifs de l'eau centrale pour les stations du large (A et C) et les stations côtières (B et D). Les numéros des stations sont reportés sur chaque diagramme. Les stations côtières sont caractérisées par les teneurs en sels nutritifs les plus élevées et les concentrations en oxygène les plus faibles, indiquant une activité de reminéralisation plus forte à relier à l'activité biologique de la couche superficielle.

Salinity/oxygen and salinity/nitrate for the offshore (A and C) and for the inshore (B and D) stations. Station numbering is indicated on each individual diagram. Coastal stations are characterized by the highest nutrient and lowest oxygen concentrations, indicative of a stronger remineralization rate connected with biological activity within the surface layer.

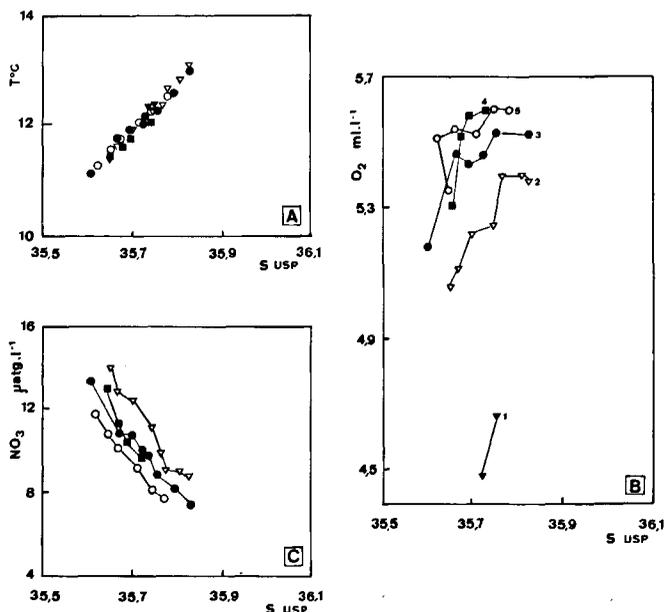
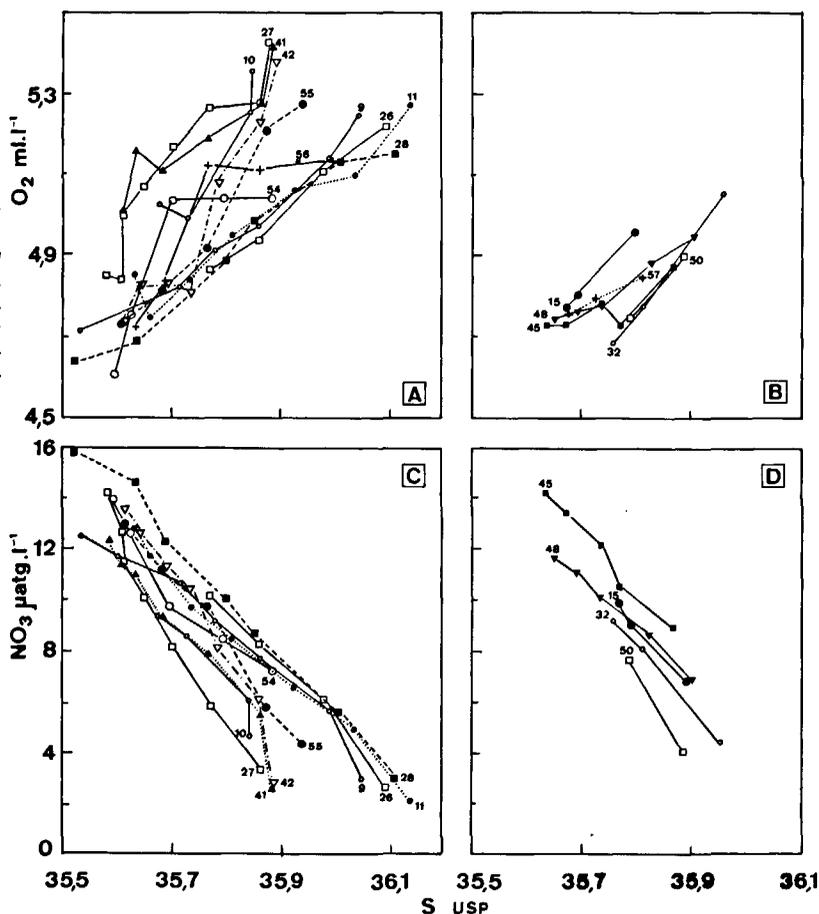


Figure 11

Diagrammes température-salinité (A), salinité-oxygène (B), salinité-nitrate (C) pour des stations des côtes de Galice. Ces diagrammes montrent l'existence d'un gradient de minéralisation côte-large analogue à celui qui a été identifié devant le Cap Siñes en septembre 1981.

Temperature/salinity (A), salinity/oxygen (B) and salinity/nitrate (C) diagrams relative to the layers of central water at stations off the NW coast of Galicia in September 1974. These diagrams indicate the existence of an offshore-inshore mineralization gradient similar to that observed off Cap Siñes in September 1981.

en nitrate (fig. 11 C) entre la côte et le large. Comme à la latitude du Cap Siñes, les eaux centrales sont moins oxygénées et plus riches en sels nutritifs près de la côte. En plus des conséquences qu'elles ont sur l'activité biologique des couches superficielles, les remontées d'eau modifient donc les caractéristiques chimiques des niveaux sous-jacents tout au long des côtes ouest de la péninsule ibérique.

Remerciements

Ce travail a été réalisé à l'aide des données obtenues par l'équipe scientifique de la campagne RCA-1. Nous remercions tous les participants ainsi que M^{me} M. C. Bonin qui a pris une part active à la préparation du manuscrit.

Il constitue une contribution à la coopération franco-portugaise dans le domaine de l'Océanologie (Programme « Upwelling du Portugal »), dans le cadre de laquelle des bourses de l'Instituto Nacional de Investigação Científica (Portugal) et du Ministère des Relations Extérieures (France) ont été attribuées.

Il est également une contribution aux programmes de recherche des formations URA 41 et GRECO P4 du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS).

RÉFÉRENCES

- Ambar I., 1983. A shallow core of Mediterranean water off western Portugal, *Deep-Sea Res.*, **30**, 677-680.
- 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., 1983. Nitrogen in upwelling systems, in: *Nitrogen in the marine environment*, edited by E. J. Carpenter and D. G. Capone, Academic Press, New York, 513-564.
- 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.
- Coste B., Minas H. J., 1982. Analyse des facteurs régissant la distribution des sels nutritifs dans la zone de remontée d'eau des côtes mauritaniennes, *Oceanol. Acta*, **5**, 3, 315-324.
- Fiúza A. F. G., 1982. The Portuguese coastal upwelling system, in: *Actual problems of oceanography in Portugal*, Junta Nacional de Investigaçao Científica e Tecnológica, Lisbon, 259 p., 46-70.
- Fiúza A. F. G., 1983. Upwelling patterns off Portugal, in: *Coastal upwelling*, edited by E. Suess and J. Thiede, Plenum Publ. Corp, New York, 85-98.
- Fiúza A. F. G., 1984. Hidrologia e dinâmica das águas costeiras de Portugal, *Thèse Doct. Sci., Univ. Lisbonne, Portugal*, 294 p.
- Fiúza A. F. G., Halpern D., 1982. Hydrographic observations of the Canary Current between 21°N and 25°5'N in March/April 1974, *Rapp. P.V. Réun. Cons. Int. Explor. Mer*, **180**, 58-64.
- Fiúza A. F. G., Macedo M. E., Guerreiro M. R., 1982. Climatological space and time variation of the Portuguese coastal upwelling, *Oceanol. Acta*, **5**, 1, 31-40.
- Fraga F., 1981. Upwelling off the Galician coast, northwest Spain, in: *Coastal upwelling*, edited by F. A. Richards, American Geophysical Union, Washington, 176-182.
- Fraga F., Mourinho C., Manriquez M., 1982. Water masses on the Galician coast: June-October, *Res. Exp. Ci.*, **10**, 51-77.
- Groupe Médiprod, 1983. Remontées d'eaux sur les côtes atlantiques du Portugal - Campagne RCA I (28 août-19 septembre 1981), Publ. CNEXO, *Résultats campagnes à la mer*, **25**, 115 p.
- Lazzara L., 1983. Énergie radiative disponible pour la photosynthèse (PAR) Publ. CNEXO, *Résultats campagnes à la mer*, **25**, 53-67.
- Madelain F., 1967. Étude hydrologique au large de la péninsule ibérique, *Cah. Océanogr.*, **19**, 125-136.
- Manriquez M., Fraga F., Massol R., 1976. Datos hidrográficos de las costas NW de España «Campana Galicia I», *Res. Exp. Ci. B/O Cornide*, **5**, 1-18.
- 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.
- Thévenot A., 1983. Températures, salinité et chlorophylle en surface (mesures en continu), Publ. CNEXO, *Résultats campagnes à la mer*, **25**, 43-47.
- Tréguer P., Le Corre P., 1975. Manuel d'analyse des sels nutritifs dans l'eau de mer (Utilisation de l'Autoanalyzer II Technicon®), Doc. Laboratoire Océanologie Chimique, Univ. Bretagne Occidentale, Brest, 110 p.
- Voituriez B., Dandonneau Y., 1974. Relations entre la structure thermique, la production primaire et la régénération des sels nutritifs dans le dôme de Guinée, *Cah. ORSTOM, sér. Océanogr.*, **12**, 241-255.
- Walsh J. J., Whitley 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.
- Weiss R. F., 1970. The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater, *Deep-Sea Res.*, **17**, 721-735.
- Wooster S. W., Bakun A., McLain D. R., 1976. The seasonal upwelling cycle along the eastern boundary of the North Atlantic, *J. Mar. Res.*, **34**, 131-141.