Méditerranée
Sels nutritifs
BilanMediterranean Sea
Nutrients
Budget

Les éléments nutritifs dans le bassin occidental de la Méditerranée. Bilan des échanges avec l'Océan Atlantique à Gibraltar

Bernard COSTE ^a, Pierre LE CORRE ^b, Hans Joachim MINAS ^a, Pascal MORIN ^b

^a Centre d'Océanologie de Marseille, Faculté des Sciences de Luminy, 13288 Marseille Cedex 9, France.

^b Université de Bretagne Occidentale, Faculté des Sciences, 29287 Brest Cedex, France.

Reçu le 28/2/86, révisé le 9/10/86, accepté le 16/10/86.

RÉSUMÉ

Au cours de la campagne Médiproduct IV, de nombreuses mesures de sels nutritifs ont été réalisées sur l'ensemble du bassin occidental de la Méditerranée, et plus particulièrement sur la partie est de la mer d'Alboran et dans le détroit de Gibraltar. Ces mesures ont conduit à une nouvelle estimation du bilan des échanges de l'azote entre la Méditerranée et l'Océan Atlantique. Les résultats montrent d'abord que l'azote sous forme organique dissoute, non pris en compte jusque-là, représente plus de 50 % de l'azote de l'eau atlantique entrante et, ensuite, que les apports continentaux au bassin n'entrent pas pour plus de 10 % dans les apports totaux.

Les valeurs supérieures à 20 du rapport N/P en Méditerranée sont expliquées à partir de l'alimentation du bassin par les couches supérieures de l'eau atlantique et par des processus de minéralisation internes au bassin.

Une couche de 100 à 400 m d'épaisseur d'eau de fond se distingue de l'eau profonde par ses caractéristiques chimiques (concentration en sels nutritifs moins élevées, teneur en oxygène dissous plus forte) qui confirment son origine superficielle.

Oceanol. Acta, 1988. Océanographie pélagique méditerranéenne, édité par H. J. Minas et P. Nival, 87-94.

ABSTRACT

Nutrients in the western basin of the Mediterranean Sea with special reference to the Strait of Gibraltar and the Alboran Sea

Nutrient measurements were performed during the Médiproduct IV cruise of the R.V. Jean Charcot in the whole western basin of the Mediterranean Sea, special attention being paid to the Alboran Sea and to the Strait of Gibraltar. From these data, new values for the nutrient budget of the Mediterranean Sea are obtained. It appears that dissolved organic nitrogen (DON) contributes to the total nitrogen input in an amount of more than 50 %, and that the river runoff contribution accounts for less than 10 % of the total nutrient input.

High values of the N : P ratio in the Mediterranean Sea (> 20) are explained by the nitrogen and phosphorus content of the superficial layers of the water inflow into the Mediterranean Sea, together with mineralization processes inside the basin itself.

Below the deep water, a 100 to 400 m thick layer of bottom water shows chemical characteristics (lower nutrient concentrations and higher dissolved oxygen concentrations) which confirm its superficial origin.

Oceanol. Acta, 1988. Océanographie pélagique méditerranéenne, édité par H. J. Minas et P. Nival, 87-94.

INTRODUCTION

Les principales caractéristiques des distributions des sels nutritifs dans le bassin méditerranéen sont bien connues : pauvreté générale par rapport aux grands océans, homogénéité des concentrations sous la couche de surface, diminution des concentrations dans les différents bassins en fonction de leur éloignement du détroit de Gibraltar (McGill, 1965). Cette pauvreté est attribuée à l'alimentation du bassin méditerranéen par les eaux superficielles atlantiques et aux mélanges verticaux hivernaux qui sont à l'origine d'un renouvellement relativement rapide des eaux profondes (ce qui explique également les teneurs élevées en oxygène dissous de ces dernières). Le cycle des éléments nutritifs et l'établissement du bilan des échanges ont donné lieu à divers travaux (Schink, 1967 ; McGill, 1969 ; Coste, 1969 ; Béthoux, 1981). Basés sur un nombre restreint de données, ces travaux aboutissent à des conclusions parfois contradictoires quant au fonctionnement général du système : la part des apports continentaux dans le budget en éléments nutritifs du bassin méditerranéen demeure en particulier mal connue.

Dans cet article, nous nous proposons de revoir les aspects particuliers du cycle de ces éléments (et plus particulièrement de l'azote) au niveau du bassin méditerranéen en nous appuyant sur les résultats récents obtenus au cours de la campagne Médiproduct IV du N.O. *Jean Charcot*.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

La campagne Médiproduct IV du N.O. *Jean Charcot* a eu lieu du 15 octobre au 17 novembre 1981 dans le bassin occidental de la Méditerranée. Les données utilisées ici sont celles obtenues sur les 83 stations hydrologiques ayant comporté des prélèvements d'eau pour mesure des paramètres chimiques (sels nutritifs et oxygène dissous) dont 11 ont de plus comporté des mesures de formes organiques du phosphore et de l'azote (fig. 1).

Les stations de prélèvement ont été placées de manière à ce qu'un double objectif soit atteint : 1) obtenir des résultats détaillés au niveau du détroit de Gibraltar et de ses abords. Pour cela un quadrillage serré de la partie ouest de la mer d'Alboran a été réalisé afin d'acquérir les données chimiques de base qui manquaient jusque-là ; 2) acquérir de nouvelles données dans l'ensemble des masses d'eau du bassin occidental. Dans ce but, une radiale traversant l'ensemble du bassin a été exécutée avec des prélèvements resserrés aux immersions supérieures à 1 000 m et une prise d'eau près du fond (en général 20 m au-dessus).

Les méthodes utilisées ainsi que l'ensemble des résultats obtenus sont rassemblés dans un document publié par ailleurs (Groupe Médiproduct, 1984). Les données hydrologiques sont celles obtenues par mesure discrète sur les échantillons prélevés à partir de la rosette de la bathysonde (thermomètre Richter et Wiese pour

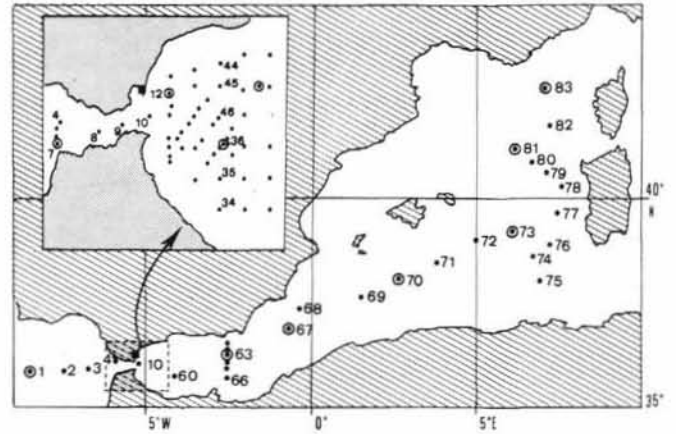


Figure 1

Position des stations occupées durant la campagne. Les stations entourées sont celles qui comprennent en plus des mesures hydrologiques et de sels nutritifs des mesures de l'azote et du phosphore organique dissous et particulaire.

Positions of stations occupied during the cruise. Stations with measurements of dissolved and particulate nitrogen and phosphorus are circled.

la température ; salinomètre Guildline 6600 pour la salinité). Les salinités sont exprimées en USP (Unité de Salinité Pratique, UNESCO, 1978). Les sels nutritifs (phosphates, nitrates + nitrites, silicates) ont été mesurés sur AutoAnalyzer Technicon par les méthodes colorimétriques automatiques suivant les modes opératoires décrits par Tréguer et Le Corre (1975). Les formes organiques de l'azote et du phosphore ont été analysées suivant les protocoles décrits par Le Corre *et al.* (1984) et Copin-Montégut et Nicolas (1984).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Rapports azote-phosphore

En plus de leur pauvreté relative en éléments nutritifs, les eaux méditerranéennes sont caractérisées par des valeurs des rapports atomiques différentes de celles rapportées pour les océans, et en particulier pour l'Océan Atlantique. Alors que pour ce dernier le rapport de Redfield (Redfield *et al.*, 1963) $N : P = 16 : 1$ est respecté, les eaux du bassin méditerranéen présentent des valeurs supérieures (McGill, 1965 ; Coste, Minas, 1967). Ainsi, McGill (1965) rapporte-t-il pour les eaux profondes de la mer Ligure des valeurs de $N : P$ égales à $23,44 \pm 3,98$. Une explication de cette particularité n'a jusqu'à présent pu être fournie.

Des résultats très voisins de ceux-ci sont retrouvés à partir des données de la campagne Médiproduct IV (fig. 2). Les rapports $N : P$ sont très proches de $16 : 1$ pour les stations du Golfe de Cadix (par exemple station 3, fig. 2 C). Par contre les valeurs de ce rapport sont de $21,1 : 1$ pour l'ensemble des prélèvements effectués en mer d'Alboran et de $21,0 : 1$ pour les prélèvements de la totalité du bassin méditerranéen.

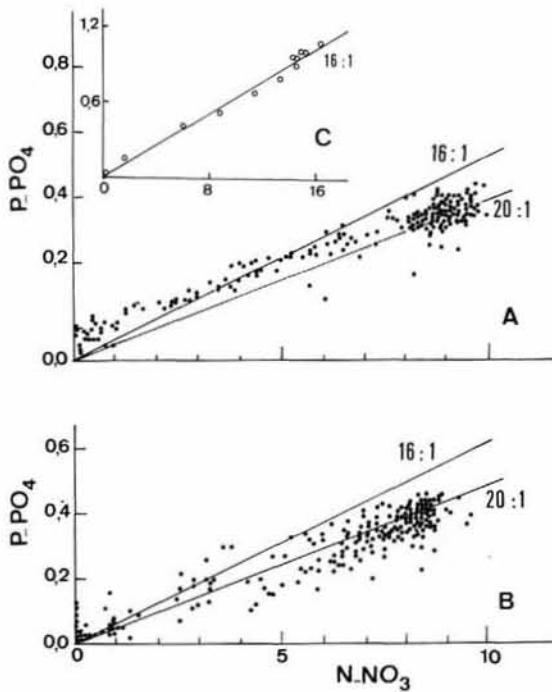


Figure 2
Diagramme nitrate-phosphate pour les stations de la mer d'Alboran (A), celles du bassin occidental (B) et une station du Golfe de Cadix (C).
Nitrate/phosphate multiplots relative to the stations of the Alboran Sea (A) and of the western basin (B), and station 3 (Gulf of Cadix).

Mais, si on s'intéresse aux valeurs du rapport azote/phosphore en prenant en considération non seulement les formes minérales comme ci-dessus mais également les formes organiques (dissoutes et particulaires) on obtient les résultats suivants :

— pour l'eau atlantique entrant en Méditerranée (sa limite inférieure étant repérée par une salinité comprise entre 37 et 37,5, suivant Lacombe et Richez, 1982) le rapport $\sum N / \sum P$ est égal à 24,0 à la station 7 et 25,2 à la station 12, qui sont les deux seules stations proches du détroit de Gibraltar auxquelles on ait déterminé les différentes formes de l'azote et du phosphore ;

— pour l'eau méditerranéenne sortante à la station 12 située juste à l'est du détroit le rapport $\sum N / \sum P$ est égal à 23,6 ;

— enfin, aux deux stations du bassin occidental proprement dit pour lesquelles on a mesuré les différentes formes de l'azote et du phosphore, les rapports $\sum N / \sum P$ moyens sur la colonne d'eau (entre la surface et 2 500 m) sont égaux à 25,4 (station 67) et 27,4 (station 70).

De ces données il ressort que, à l'inverse de ce que l'on constate au niveau de l'azote et du phosphore sous forme minérale, les eaux du bassin méditerranéen ne présentent pas de différence significative vis-à-vis des eaux atlantiques qui alimentent le bassin, si l'on considère l'ensemble des formes du phosphore et de l'azote. Il semble donc que les valeurs élevées du rapport azote/phosphore sous forme minérale n'aient pas à être recherchées dans des apports spécifiques au

bassin méditerranéen (apports continentaux ou fixation d'azote moléculaire par exemple), mais plutôt dans l'évolution de l'eau atlantique à l'intérieur du bassin méditerranéen. A partir des données de la station 12, on peut estimer que la part des formes minérales de l'azote dans l'eau atlantique entrante est de 40 %, alors qu'elle est de 75 % dans l'eau méditerranéenne sortante. Le bassin méditerranéen se comporte donc comme un bassin de minéralisation, et c'est dans les processus internes de transformation qu'il faut rechercher la disparité avec l'Océan Atlantique.

Eau profonde et eau de fond

Aux stations de la campagne Médipro IV, situées entre la mer d'Alboran et le nord du bassin occidental (stations 67 à 83, fig. 1), les caractéristiques hydrologiques ont été déterminées de la surface jusqu'à environ 20 m au-dessus du fond (emploi d'un pinger acoustique). Les résultats obtenus ont été analysés par Gascard et Richez (1985) et, dans un cadre plus général regroupant des campagnes réalisées entre 1973 et 1981, par Lacombe *et al.* (1985). Ces auteurs montrent en particulier (fig. 3) :

- que les eaux profondes présentent des caractéristiques $\theta - S$ plus variables que ce qui était attendu ;
 - que la limite inférieure de l'eau profonde est marquée par un minimum de température et de salinité, et qu'en dessous de cette eau on trouve une couche d'eau de fond de 100 à 400 m d'épaisseur caractérisée par des salinités et densités plus élevées.
- Les prélèvements discrets opérés avec la rosette parallèlement aux mesures de la bathysonde ont permis un échantillonnage dans ces deux eaux. Les données chimiques correspondant aux stations 70 et

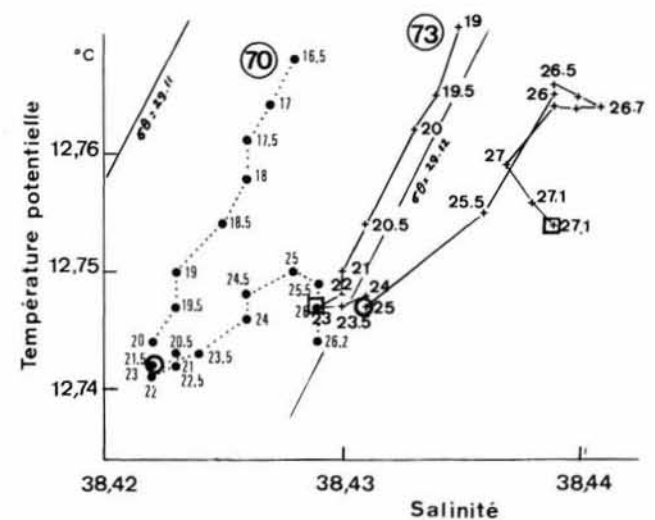


Figure 3
Diagramme $\theta - S$ des stations 70 et 73 pour les immersions supérieures à 1 600 m (d'après Gascard et Richez, 1985). Les profondeurs reportées sont indiquées en hectomètres. Les prélèvements avec mesures chimiques dans l'eau profonde sont repérés par un carré, ceux dans l'eau de fond par un rond.
 $\theta - S$ diagram for stations 70 and 73 (depths greater than 1 600 m ; from Gascard and Richez, 1985). Depths are in hectometres. Depths with chemical measurements are indicated by squares for deep water and by circles for bottom water.

Tableau 1
Caractéristiques chimiques de l'eau profonde et de l'eau de fond.
Chemical characteristics of deep and bottom waters

	Station 70		Station 73	
	eau profonde	eau de fond	eau profonde	eau de fond
Profondeur de prélèvement (m)	2 304	2 615	2 513	2 719
N-NO ₃ (µatg/l)	8,2	7,8	8,4	8,0
P-PO ₄ (µatg/l)	0,35	0,34	0,36	0,34
Si-SiO ₃ (µatg/l)	9,7	8,6	9,7	8,6
O ₂ (ml/l)	4,58	4,75	4,58	4,84

73 sont rassemblées dans le tableau 1. Elles font apparaître une différence significative des valeurs des différents paramètres chimiques : les eaux de fond présentent par rapport aux eaux profondes une concentration moins élevée pour l'ensemble des sels nutritifs (phosphate, nitrate et silicate), et une teneur en oxygène dissous supérieure. Ces différences sont faibles (0,4 µatg/l N-NO₃, 0,01 µatg/l P-PO₄, 1,1 µatg/l Si-Si(OH)₄ et 0,30 ml/l O₂) mais significatives à l'exception des phosphates pour lesquelles elles sont du même ordre de grandeur que la précision de la mesure. On doit noter que, en raison de la grande homogénéité que présentent habituellement ces caractéristiques chimiques au-dessous des eaux superficielles, les concentrations mesurées dans l'eau de fond (c'est-à-dire à 2 615 m pour la station 70 et 2 719 m pour la station 73) ne sont par ailleurs rencontrées à ces stations qu'à des immersions beaucoup plus proches de la surface. Ainsi, on mesure des valeurs identiques de nitrate à 200 m (station 70) et 400 m (station 73), de silicate à 800 m (station 70) et 1 000 m (station 73) et d'oxygène à 100 m (station 70) et 200 m (station 73). Les mesures chimiques confirment donc l'interprétation avancée par Gascard et Richez (1985) et par Lacombe *et al.* (1985) quant à l'origine de l'eau de fond. Pour ces auteurs, cette eau proviendrait des eaux denses formées en hiver par les mélanges verticaux sous l'action de l'évaporation et du refroidissement des couches superficielles (Gascard, 1978).

Détroit de Gibraltar et mer d'Alboran

Six stations comportant des mesures des paramètres chimiques ont été effectuées pendant Médiprod IV dans la proximité immédiate du détroit de Gibraltar : la station 7 (exécutée à 3 reprises) à l'Ouest au point A4 (Lacombe, 1961), les stations 8 et 9 à l'Est du détroit et la station 10 plus à l'Est sur des fonds plus importants (fig. 1). Gascard et Richez (1985) ont montré que les eaux superficielles entrantes dans le bassin méditerranéen étaient un mélange d'Eau Centrale Nord-Atlantique (ECNA : Sverdrup *et al.*, 1942) et d'une eau superficielle originaire des côtes espagnoles et portugaises. Au point de vue éléments nutritifs (fig. 4), les distributions verticales à ces stations sont caractérisées par une couche de surface (≈ 50 m d'épaisseur) très appauvrie, suivie d'une zone de transition avec une augmentation rapide des concen-

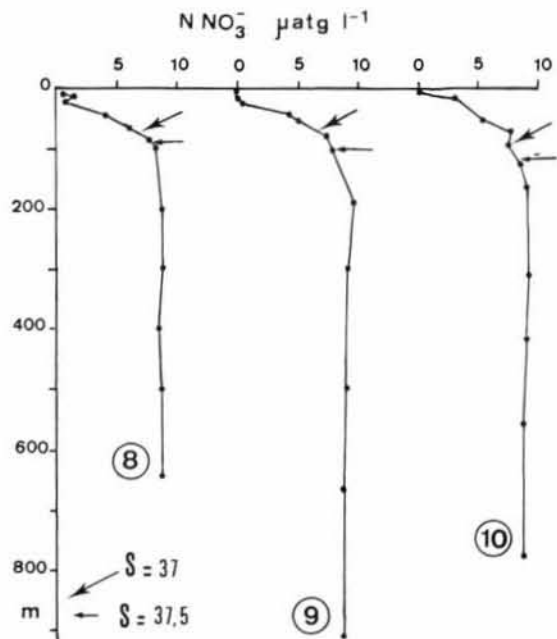


Figure 4
Distribution verticale de l'azote sous forme de nitrate pour trois stations du détroit de Gibraltar. Les flèches indiquent l'immersion des isohalines 37 et 37,5.

Vertical distribution of nitrate-nitrogen for three stations of the Straits of Gibraltar. Arrows indicate the position of isohalines 37 and 37.5.

trations et, au-dessous, une couche d'eau de concentrations à peu près uniformes (8,5 à 9,0 µatg/l N-NO₃⁻ ; 0,45 à 0,50 µatg/l P-PO₄⁼). La caractéristique la plus importante de ces distributions est la confirmation de résultats antérieurs (Coste, 1969) montrant que l'eau atlantique introduit dans le bassin méditerranéen, aux immersions proches de l'interface, des éléments nutritifs sous forme minérale. Que l'on prenne 37,0 ou 37,5 comme valeur de la salinité repérant l'interface séparant les flux entrant et sortant (Lacombe, Richez, 1982), la figure 4 montre clairement que la concentration d'une partie de l'eau entrante peut atteindre 6 à 7 µatg/l N-NO₃⁻. L'intégration sur la colonne d'eau permet d'estimer la concentration moyenne aussi bien en salinité qu'en éléments nutritifs de l'eau atlantique entrante. Elle permet aussi de quantifier le flux entrant des formes minérales. Ces résultats (tab. 2) montrent :

— que, bien que les isohalines 37 et 37,5 se trouvent dans la couche de transition définie plus haut pour les distributions verticales des concentrations de sels nutritifs (fig. 4), les estimations des teneurs moyennes entrantes de ces éléments ne diffèrent pas sensiblement en fonction du choix de l'isohaline comme interface entre flux entrant et sortant ;

— qu'une tendance à un certain enrichissement des stations les plus à l'Est se manifeste. Ceci peut être expliqué par des mélanges entre les deux courants opposés et une recirculation vers le bassin méditerranéen d'une fraction de l'eau méditerranéenne sortante telle qu'elle est décrite par Schink (1967). Cette interprétation est confortée par l'accroissement concomitant des salinités moyennes de l'eau entrante tel qu'il apparaît dans le tableau 2.

Tableau 2

Valeurs moyennes des caractéristiques des eaux pénétrant dans le bassin méditerranéen au détroit de Gibraltar.
Mean values of characteristics of water entering the Mediterranean basin at the Strait of Gibraltar.

Station	Interface choisie à S = 37,0			Interface choisie à S = 37,5		
	Z (m)	S	N-NO ₃ (µatg/l)	Z (m)	S	N-NO ₃ (µatg/l)
8	74	36,37	3,1	86	36,49	3,7
9	72	36,38	2,7	97	36,64	3,9
10	93	36,51	4,8	117	36,67	5,4

La situation générale rencontrée dans la partie est de la mer d'Alboran proche du détroit de Gibraltar est bien représentée à partir des distributions des paramètres hydrologiques et chimiques sur la radiale sud-nord passant par les stations 34, 35, 36, 46, 45 et 44 (fig. 1 et 5). Elle peut être schématisée à partir des points suivants :

1) la partie Nord est intéressée par un phénomène d'upwelling qui a déjà été décrit au point de vue hydrologique (Lanoix, 1974), et qui se manifeste par des températures des eaux de surface inférieures à 19 °C. Au point de vue des paramètres chimiques, il

et des teneurs en oxygène dissous inférieures à 4 ml/l. L'origine de ces valeurs ne peut être attribuée à des processus physiques (mélanges d'eaux). En effet, le diagramme T-S correspondant (fig. 6) montre que

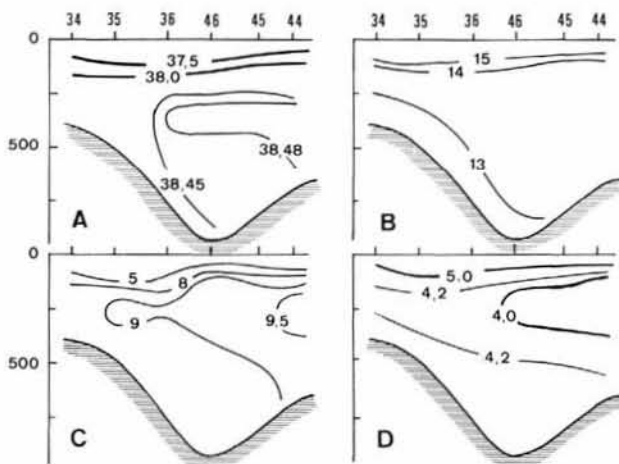


Figure 5
 Coupes à travers la mer d'Alboran. A = salinité, B = température (°C); C = azote nitrique (µatg/l); D = oxygène dissous (ml/l).
 Section across the Alboran Sea. A = salinity; B = temperature (°C); C = nitrate-nitrogen (µatg/l); D = dissolved oxygen (ml/l).

n'y a pas de signature dans la couche superficielle qui est totalement appauvrie en éléments nutritifs et saturée en oxygène dissous. Ceci peut être attribué à l'activité biologique induite par l'upwelling (Minas *et al.*, 1983). En profondeur, le phénomène de remontée d'eau se manifeste par une différence dans les immersions des différentes isolignes : l'isoplèthe 5 µatg/l N-NO₃ se situe aux alentours de 60 m de profondeur dans la partie Nord, alors qu'elle est au-dessous de 100 m de profondeur aux stations du Sud ;
 2) la partie centrale et la partie Nord sont caractérisées par l'existence en subsurface (entre 150 et 400 m de profondeur) d'une « poche de minéralisation » avec des valeurs d'azote nitrique supérieures à 9 µatg/l

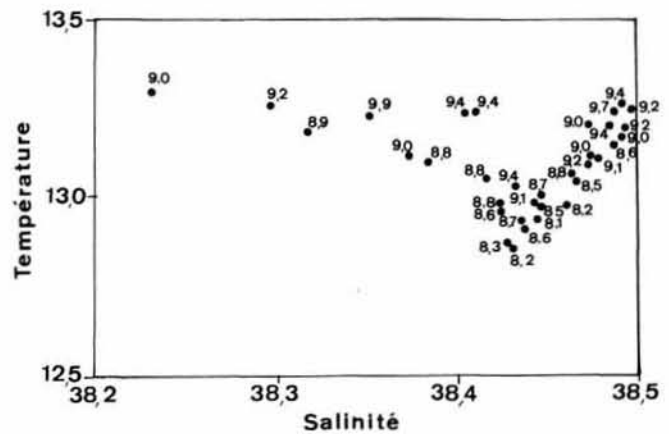


Figure 6
 Diagramme T-S des stations de la radiale à travers la mer d'Alboran. Les valeurs numériques indiquent les concentrations (µatg/l) en nitrate des différents prélèvements.
 T-S diagram for the section across the Alboran Sea. Numerical values are the nitrate-nitrogen concentrations (µatg/l).

ces eaux sont formées par un mélange d'eau intermédiaire caractérisée par un maximum de température et de salinité avec des eaux plus superficielles plus chaudes et moins salées. Or, les concentrations en nitrate et en oxygène dissous de l'eau intermédiaire dans la partie est de la mer d'Alboran (stations 61 à 66) sont respectivement inférieures à 9 µatg/l et supérieures à 4 ml/l. Quant aux eaux plus superficielles, elles sont largement plus pauvres en éléments nutritifs et plus oxygénées. Cet horizon a été interprété (Minas *et al.*, 1984) comme la conséquence de la minéralisation du matériel particulaire produit en surface sous l'effet de l'enrichissement nutritif (upwelling et mélanges au niveau de l'interface séparant les flux opposés) ;

3) dans la partie Sud (stations 34 et 35), le maximum de nitrate et le minimum d'oxygène dissous s'estompent pour deux raisons : il n'y a plus de « poche de minéralisation » liée à une forte activité biologique dans les couches superficielles et il y a disparition de l'eau intermédiaire (marquée par un maximum prononcé de salinité aux stations plus au Nord : fig. 5 D) et son remplacement par de l'eau profonde (S ≈

38,43) qui remonte contre le talus continental marocain et qui est moins riche en azote nitrique ($\approx 8,2-8,3 \mu\text{atg/l}$) et plus oxygénée ($> 4,3 \text{ ml/l}$). Ce processus est décrit par Bryden *et al.* (1978), Parrilla et Kinder (1983) et Gascard et Richez (1985), qui concluent que cette eau est en cours de progression vers le détroit. A partir de l'analyse des données de la campagne Médipro IV, les derniers auteurs cités définissent une eau ("Eastern Sill Water") formée à parts pratiquement égales d'eau intermédiaire et d'eau profonde du bassin occidental. C'est cette eau qui constituerait l'eau méditerranéenne sortante. Compte tenu des concentrations en azote nitrique de l'eau profonde ($\approx 8,2 \mu\text{atg/l}$) et de l'eau intermédiaire dans la partie ouest de la mer d'Alboran ($\approx 9,0 \mu\text{atg/l}$), on déduit que l'eau de sortie a alors une concentration de l'ordre de $8,6 \mu\text{atg/l}$. Ce résultat est en accord avec les valeurs de nitrate reportées sur le diagramme T-S des stations de la radiale considérée (fig. 6), pour les points correspondant au mélange eau intermédiaire-eau profonde.

La figure 7 représente les distributions verticales des différentes formes d'azote mesurées à la station 12 à l'est du détroit (fig. 1). Elle montre :

— la part faible de l'azote organique sous forme particulaire qui atteint $0,5 \mu\text{atg/l}$ dans les eaux superficielles, mais ne dépasse pas $0,05 \mu\text{atg/l}$ dans les couches plus profondes ;

— la distribution particulière de l'azote organique sous forme dissoute. Dans l'eau atlantique entrante, sa concentration est de l'ordre de $6 \mu\text{atg/l}$, alors que dans les couches sous-jacentes sa concentration, très homogène, est proche de $3 \mu\text{atg/l}$. Ces résultats sont représentatifs de ceux trouvés en d'autres points du bassin (Le Corre *et al.*, 1984 ; Coste, données non publiées). Ils apportent, pour la première fois, des informations sur cette forme d'azote qui n'avait pas été prise en compte jusqu'à présent et qui, par son niveau relatif de concentration vis-à-vis de l'azote sous forme minérale, joue un rôle important dans le

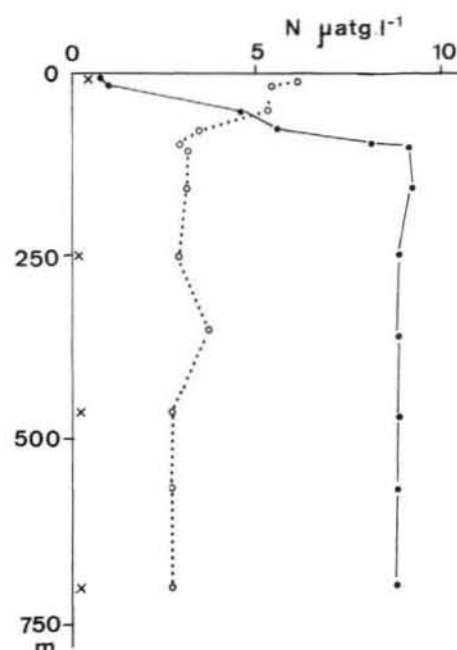


Figure 7
Distribution verticale ($\mu\text{atg/l}$) des différentes formes d'azote mesurées à la station 12 (● = azote nitrique, ○ = azote organique dissous ; × = azote organique particulaire).

Vertical distribution of nitrate-nitrogen (●), dissolved organic nitrogen (○) and particulate organic nitrogen (×) for station 12. Units are $\mu\text{atg/l}$.

cycle biogéochimique de cet élément dans le bassin méditerranéen. Il apparaît en particulier qu'il constitue plus de 50 % de l'azote de l'eau atlantique entrante.

Bilan des échanges d'azote entre la Méditerranée et l'Océan Atlantique

Les données acquises au cours de Médipro IV, permettant une nouvelle quantification du bilan des échanges des éléments nutritifs, ont été présentées plus haut et sont rassemblées dans le tableau 3.

Tableau 3

Éléments d'établissement du bilan des échanges d'azote au détroit de Gibraltar.
Elements of appreciation of nitrogen exchanges occurring in the Strait of Gibraltar.

	Concentrations des différentes formes d'azote ($\mu\text{atg/l}$)		Concentration totale ($\mu\text{atg/l}$)	Valeurs de flux (selon Lacombe, 1971)		Valeurs de flux (selon Béthoux, 1980)	
				Flux $\times 10^{15}$ (l/an)	Quantité transportée $\times 10^{17}$ ($\mu\text{atg/an}$)	Flux $\times 10^{15}$ (l/an)	Quantité transportée $\times 10^{17}$ ($\mu\text{atg/an}$)
Eau entrante	NO ₃ ^a	4,0	10,0	38,5	3,85	53,0	5,30
	NOD ^b	5,5					
	NP ^c	0,5					
Eau sortante	NO ₃ ^a	8,6	11,6	36,0	4,18	50,5	5,86
	NOD ^b	3,0					
	NP ^c	0,0					
Déficit en azote ($\times 10^{15} \mu\text{atg/an}$)				33		56	
Pourcentage ^d				7,9		9,6	

^a azote minéral sous forme nitrique.

^b azote organique dissous.

^c azote organique particulaire.

^d pourcentage par rapport à la quantité totale sortante.

Au total, la concentration en azote de l'eau entrante est de 10,0 $\mu\text{atg/l}$, alors que celle de l'eau sortante est de 11,6 $\mu\text{atg/l}$. Ces estimations se différencient nettement de celles utilisées antérieurement (McGill, 1969, prend pour les eaux entrante et sortante respectivement 4 et 6 $\mu\text{atg/l}$) en raison du réseau plus dense d'observations et, surtout, par la prise en compte de l'ensemble des formes de l'azote.

Ces résultats, associés aux estimations des flux d'eau par Lacombe (1971) et Béthoux (1980), conduisent à établir le bilan des échanges au détroit de Gibraltar (tab. 3). Il apparaît que, au niveau du détroit de Gibraltar, le bassin méditerranéen présente un déficit en azote de 30 à 60 $\cdot 10^{15}$ $\mu\text{atg/an}$. Si l'on se place dans l'hypothèse d'un état d'équilibre, ce déficit est compensé par des apports internes au bassin, parmi lesquels les apports continentaux par les fleuves sont prépondérants. Pour que les échanges soient équilibrés, ces derniers doivent alors représenter moins de 10 % de la quantité totale sortante. Cette estimation est largement inférieure à celles fournies jusqu'à présent (supérieures à 30 %), en raison essentiellement du fait que la prise en compte des fractions organiques tend à diminuer la différence de concentration dans les eaux entrante et sortante. Ce résultat est intéressant en ce sens qu'il montre que le cycle des éléments nutritifs dans le bassin méditerranéen est moins dépendant des apports continentaux, eux-mêmes soumis à l'activité humaine (engrais, industrialisation...), que ce que les résultats antérieurs pouvaient laisser présager.

Il est intéressant d'effectuer la comparaison entre les quantités nettes exportées au détroit de Gibraltar et celles introduites dans le bassin méditerranéen par les apports continentaux ; les premières étant évaluées par le calcul (tab. 3), les secondes mesurées directement. McGill (1969) fournit pour l'azote apporté par l'ensemble des fleuves une estimation de 28 $\cdot 10^{15}$ $\mu\text{atg/an}$; ce résultat est conforme à une récente estimation de 7 $\cdot 10^{15}$ $\mu\text{atg/an}$ obtenue en 1984 pour le Rhône seul (Coste, données non publiées). Ces apports, qui sont du même ordre de grandeur que le déficit observé à Gibraltar, permettent de fermer le budget global, et leur estimation conforte les conclusions précédentes. Il est vraisemblable que les valeurs de 180 $\cdot 10^{15}$ $\mu\text{atg/an}$ d'azote fournies par l'UNEP (1977) sont surévaluées.

CONCLUSION

Les observations rapportées sur les distributions des éléments nutritifs au cours de Médiprod IV sont en accord avec les données antérieures mais, par leur densité et par la prise en compte des diverses formes sous lesquelles ils sont présents, elles permettent de préciser différents aspects de leur cycle biogéochimique dans le bassin méditerranéen, et d'en fournir de nouvelles interprétations.

Le rôle secondaire que semblent jouer les apports continentaux dans l'établissement du bilan des échanges a pour conséquence de renforcer celui des échanges à Gibraltar et les transformations au sein du bassin lui-même. Les conditions rencontrées (niveau de concentration, rapports atomiques entre les éléments nutritifs) sont dues pour l'essentiel à l'approvisionnement par les couches superficielles atlantiques, et à une minéralisation d'une partie de la matière organique dissoute introduite. Globalement, le bassin se comporte comme un bassin de minéralisation. Cependant, dans le détail, le cycle est plus complexe : les apports sous forme minérale (eau atlantique entrante et fleuves) sont d'abord transformés en matière organique particulaire, qui peut ensuite être minéralisée. Ces résultats mettent en lumière le rôle important tenu par la fraction organique dissoute qui, faute de mesures jusqu'à présent, n'avait pu être prise en compte dans les travaux antérieurs.

Le rôle de « traceur » des phénomènes hydrologiques de ces composés chimiques est à nouveau apparu. Les quelques résultats amenant à la distinction entre eau profonde et eau de fond, et confirmant l'hypothèse de l'origine superficielle ou « récente » de l'eau de fond, mériteraient à l'avenir d'être complétés par un échantillonnage plus resserré.

Remerciements

Ce travail a été réalisé essentiellement à l'aide des données obtenues par l'équipe scientifique de la campagne Médiprod IV. Nous remercions tous les participants, ainsi que Mme M.-C. Bonin qui nous a apporté son aide pour la préparation du manuscrit.

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

RÉFÉRENCES

- Béthoux J.-P., 1980. Mean water fluxes across sections in the Mediterranean Sea, evaluated on the basis of water and salt budgets and of observed salinities, *Oceanol. Acta*, **3**, 1, 79-88.
- Béthoux J.-P., 1981. Le phosphore et l'azote en Mer Méditerranée, bilans et fertilité potentielle, *Mar. Chem.*, **10**, 141-158.
- Bryden H. L., Millard R. C., Porter D. L., 1978. CTD observations in the Western Mediterranean Sea during cruise 118, Leg 2 of R.V. Chain, February 1975, Woods Hole Oceanographic Institution Technical Report 78-26, 38 p.
- Copin-Montégut G., Nicolas E., 1984. Particules en suspension dans l'eau de mer, *Publ. CNEOX : Résultats des campagnes à la mer*, **26**, 97-98.
- Coste B., 1969. Échanges des sels nutritifs dissous entre la Mer Méditerranée et l'Océan Atlantique, *Cah. Océanogr.*, **21**, 943-963.
- Coste B., Minas H. J., 1967. Premières observations sur la distribution des taux de productivité et des concentrations en sels nutritifs des eaux de surface du Golfe du Lion, *Cah. Océanogr.*, **19**, 417-427.

- Gascard J.-C., 1978. Mediterranean deep water formation, baroclinic instability and ocean eddies, *Oceanol. Acta*, **1**, 3, 315-330.
- Gascard J.-C., Richez C., 1985. Water masses and circulation in the western Alboran Sea and in the Straits of Gibraltar, *Progr. Oceanogr.*, **15**, 157-216.
- Groupe Médiprod, 1984. Propriétés hydrologiques et chimiques des eaux du bassin occidental de la Méditerranée (Campagne Médiprod IV-15 octobre-17 novembre 1981), *Publ. CNEXO, Résultats des campagnes à la mer*, **26**, 106 p.
- Lacombe H., 1961. Contribution à l'étude du détroit de Gibraltar. I : Étude dynamique. *Cah. Océanogr.*, **13**, 73-107.
- Lacombe H., 1971. Le détroit de Gibraltar, *Notes Mém. Serv. Géol. Maroc*, **222 bis**, 111-146.
- Lacombe H., Richez C., 1982. The regime of the Straits of Gibraltar, in: *Hydrodynamics of semi-enclosed seas*, édité par J. C. J. Nihoul, Elsevier, Amsterdam, 13-74.
- Lacombe H., Tchernia P., Gamberoni L., 1985. Variable bottom water in the western Mediterranean basin, *Progr. Oceanogr.* **14**, 319-338.
- Lanoix F., 1974. Projet Alboran : Étude hydrologique et dynamique de la mer d'Alboran (juillet et août 1962), *NATO Tech. Rep.*, **66**.
- Le Corre P., Morin P., Birrien J.-L., 1984. Répartition de la matière organique dissoute (N et P dissous), *Publ. CNEXO : Résultats des campagnes à la mer*, **26**, 95-96.
- McGill D. A., 1965. The relative supplies of phosphate, nitrate and silicate in the Mediterranean Sea, *Rapp. Comm. Inter. Mer Médit.*, **18**, 737-744.
- McGill D. A., 1969. A budget for dissolved nutrient salts in the Mediterranean Sea, *Cah. Océanogr.*, **21**, 543-554.
- Minas H. J., Coste B., Minas M., 1984. Océanographie du détroit de Gibraltar et des parages annexes, *Courrier CNRS*, **57**, 10-17.
- Minas M., Coste B., Le Corre P., Minas H. J., Packard T. T., Raimbault P., 1983. Rôle de la circulation en mer d'Alboran au voisinage du détroit de Gibraltar, sur le système production-régénération (Campagne Médiprod IV du Jean Charcot), *Rapp. Comm. Inter. Mer Médit.*, **28**, 7, 59-61.
- Parrilla G., Kinder T. H., 1983. The physical oceanography of the Alboran Sea. *NATO Advanced Research Workshop "Atmospheric and oceanic circulation in the Mediterranean basin"*, Santa Teresa, Italy, 7-13 September 1983.
- Redfield A. C., Ketchum B. H., Richards F. A., 1963. The influence of organisms on the composition of sea-water, in: *The sea, ideas and observations on progress in the study of the seas*, vol. 2, édité par N. M. Hill, Interscience, New York, 26-77.
- Schink D. R., 1967. Budget for dissolved silica in the Mediterranean Sea, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **31**, 987-999.
- Sverdrup H. U., Johnson M. W., Fleming R. H., 1942. *The oceans : their physics, chemistry and general biology*, Prentice Hall, New York, 1087 p.
- Tréguer P., Le Corre P., 1975. *Manuel d'analyse des sels nutritifs dans l'eau de mer (utilisation de l'Autoanalyser II Technicon®)*, Laboratoire d'Océanographie chimique, Université de Bretagne Occidentale, 2^e éd., Brest, 110 p.
- UNEP (United Nations Environment Programme), 1977. Preliminary report on the state of pollution of the Mediterranean Sea, UNEP Prel. Rep. No. IG. 11/INF. 4, 1-209.
- UNESCO, 1978. Report of the joint panel on oceanographic tables and standards, *UNESCO Tech. Pap. Mar. Sci.*, **28**, 35 p.